

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный технический университет–УПИ
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

С.П.Буркин
В.В.Шимов
Р.Ф.Исхаков
Е.А.Андрюкова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ В МНОГОВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Научный редактор – доц., канд.техн.наук Ю.В.Инатович

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области
металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению 150100 – Metallургия

Учебное пособие издано в рамках ФЦП
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»,
Государственный контракт №02.740.11.0152

Екатеринбург
УГТУ – УПИ

2010

УДК 621.771
ББК 34.62
С56

Рецензенты:

кафедра обработки металлов давлением Самарского государственного аэрокосмического университета (чл.-корр. РАН, проф. Ф.В. Гречников);
генеральный директор ЗАО НПО «Уральские технологии», канд.техн.наук
А.Н. Колесов

Буркин С.П., Шимов В.В., Исхаков Р.Ф., Андрюкова Е.А.

С56 Совершенствование техники и технологии прокатки в многовалковых калибрах: учебное пособие /С.П. Буркин, В.В. Шимов, Р.Ф. Исхаков, Е.А. Андрюкова. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. 362 с.

ISBN 978-5-321-01641-1

Показан один из возможно перспективных путей решения современных проблем мини-металлургических производств, связанных с актуальной потребностью в расширении сортамента металлоизделий, выпускаемых малыми партиями, производство которых на крупных металлургических заводах и комбинатах экономически нецелесообразно из-за длительных и сложных переналадок оборудования и систем управления технологическими процессами.

Книга может быть полезна инженерам-металлургам, студентам, бакалаврам, магистрам и аспирантам, обучающимся по направлению 150100-Металлургия и специализирующимся в области черных металлов и обработки металлов давлением.

Библиогр.: 154 назв. Табл. 15 Рис. 142. Прил. 4.

УДК 621.771
ББК 34.62

ISBN 978-5-321-01647-1

© УГТУ–УПИ, 2010
© Авторы, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ И ТРУБ В КЛЕТЯХ С МНОГОВАЛКОВЫМИ КАЛИБРАМИ	12
1.1.Перспективы создания совмещенных агрегатов для производства прутков, профилей и труб.....	12
1.2.Актуальная проблема производства проволоочной заготовки и труб из коррозионно-стойких сталей для атомной энергетики.....	39
1.3.Обзор промышленно используемых технологий производства прутков и профилей прокаткой в многовалковых калибрах.....	51
1.4.Современные технологии редуциционной и редуционно- растяжной прокатки труб.....	67
1.5.Постановка задачи разработки и исследований технологии производства простых сортовых профилей и труб	94
2.ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОВМЕЩЕННОГО ПРЕССОВО- ПРОКАТНОГО АГРЕГАТА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРУТКОВ И ТРУБ.....	101
2.1.Перспективы применения гидропривода валков прокатных клеток.....	101
2.2.Перспективный вариант конструкции гидропривода валков.....	108
2.3.Конструктивные особенности прокатных клеток и станов для прокатки прутков и труб.....	123
2.4.Простейший вариант автоматического согласования скоростного режима прессования и непрерывной прокатки.....	138
2.5.Выводы.....	147
3.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ И ТРУБ В КАЛИБРАХ КОНИЧЕСКИХ ВАЛКОВ.....	148
3.1.Описание конструкции экспериментальной установки и методика замера параметров прокатки.....	148
3.2.Автоматизированная система сбора, обработки и хранения опытных данных.....	151
3.3.Результаты экспериментального определения параметров как априорная информация о процессе прокатки в калибрах конических валков.....	156
3.4.Выводы.....	173
4.ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ КОНИЧЕСКИХ ВАЛКОВ.....	174

4.1. Анализ кинематических и силовых параметров прокатки прутков по схеме круг–квадрат–круг в калибрах конических валков.....	174
4.2. Постановка конечно-элементных моделей процессов прокатки в калибрах конических валков.....	195
4.3. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния при прокатке по схеме круг–квадрат–круг.....	200
4.4. Вычислительный эксперимент на базе конечно-элементной модели редуционно-растяжной прокатки труб.....	213
4.5. Статистический анализ результатов вычислительного эксперимента и построение зависимостей катающего диаметра и изменения толщины стенки.....	218
4.6. Сопоставление опытных и расчетных данных математических моделей прокатки в калибрах конических валков.....	231
4.7. Выводы.....	245
5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ–ПРОКАТКИ–РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ.....	247
5.1. Температурная модель процесса передачи горячепрессованного профиля от пресса к прокатному стану.....	247
5.2. Температурная модель непрерывного прокатного стана.....	257
5.3. Температурная модель линии охлаждения катаных профилей.....	264
5.4. Деформационно-скоростная модель непрерывного стана.....	270
5.5. Структура системы управления совмещенным процессом прессования–прокатки–регламентированного охлаждения профилей и труб.....	283
5.6. Выводы.....	291
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	293
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	300
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	314
П1. Листинги программ систем сбора, обработки и хранения опытных данных.....	315
П2. Результаты вычислительного эксперимента.....	338
П3. Система сбора и обработки информации торсионного пластометра.....	341
П4. Пример численной реализации проектирования технологии редуционной прокатки нержавеющей труб из горячепрессованной заготовки.....	351

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие технологии и техники металлургического производства во всем мире и в России в частности идет или по крайней мере должно идти в плане решения актуальных проблем этого производства, перечень которых может быть сведен к следующему.

1. Изменение сырьевой базы металлургии и, в первую очередь, обеднение руд, что существенно удорожает этап рудоподготовки и требует разработки и освоения новых эффективных технологий переработки полиметаллических руд. Классический металлургический цикл, включающий доменный передел, несмотря на низкое энергопотребление, становится невыгодным из-за дефицита и непрерывного удорожания коксующихся углей. Полиметаллические руды далеко не всегда пригодны для доменной плавки. Например, титаномagnetитовая руда требует на стадии обогащения избавляться от титана. В этой ситуации титан накапливается в отвалах и ждет пригодной для промышленного использования технологии получения титанового концентрата, который в настоящее время в Россию завозится из-за границы. Увеличение доли вторичных металлов в общем объеме металлопроизводства чаще всего приводит к снижению чистых металлов и сплавов и в итоге – к ухудшению качества продукции. Трудность очистки стали от меди приводит к постепенному заражению всех сталей, получаемых переплавкой лома, медью и снижению их пластичности.

К созданию новых технологий в металлургии подталкивает и непрерывное и очень интенсивное накопление отходов как черной, так и цветной металлургии. Многие отходы по содержанию подлежащих извлечению металлов успешно конкурируют с ныне добываемыми рудами.

В черной металлургии до сих пор отдается предпочтение процессам твердофазного восстановления железа углеродистыми восстановителями. Технологии жидкофазного восстановления и восстановления железа из оксидов металлическими восстановителями находятся в недоразвитом состоянии и непригодны пока для широкого промышленного применения. При производстве алюминия до сих

пор не используются технологии переработки кианитов. Медь преимущественно извлекается из сульфидных руд, а в области переработки оксидных медных руд практически нет прогресса. Техногенные металлургические отходы не утилизируются из-за отсутствия экологически привлекательных технологий.

2. Непрерывное удорожание энергоресурсов – важный стимул к разработке новых и освоению давно известных и исследованных ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов в металлургии. В большинстве технологий производства металлоизделий и полуфабрикатов методами горячей обработки давлением наибольшая доля энергозатрат приходится на нагрев металла. Эта доля растет в случае необходимости неоднократных промежуточных нагревов и термических обработок. Когда изделия производятся с использованием холодной пластической обработки (ХПТ, волочение), энергозатраты в основном приходятся на многочисленные промежуточные отжиги. Низкие коэффициенты использования металла всегда свидетельствуют о несовершенстве технологий с точки зрения энергопотребления.

Создание агрегатов и комплексов, позволяющих совмещать технологические операции, является трудноразрешимой задачей в плане удачной компоновки и обеспечения регламентированного температурно-скоростного режима. Максимальное энергосбережение достигается в случае совмещения процессов выплавки, литья и горячей деформационной обработки при минимальной степени деформации, приходящейся на холодное пластическое формообразование с промежуточными термическими обработками, если с последними не связана единственная возможность формирования требуемых физико-механических свойств металлоизделий.

В плане энергосбережения не всегда оправдана тенденция повышения производительности. Например, высокая скорость прокатки при производстве мелких сортовых профилей и катанки всегда повышает удельные энергозатраты из-за подавления процессов динамического разупрочнения и необходимости интенсивного отвода тепла деформации с целью предотвращения перегрева и даже пережога металла проката.

Изменение сырьевой базы металлургии вызывает увеличение энергопотребления из-за дополнительных затрат на обогащение и на рафинирование расплавов. Даже вовлечение в переработку большого количества лома требует более тщательной сортировки. Попадание в черный лом цветных металлов удлиняет процедуру внепечной обработки стали, например в печь-ковшах.

3. На изменение структуры металлургического производства оказывает влияние непрерывное расширение как марочного, так и типоразмерного ассортиментов металлопродукции, а также ужесточение требований к качеству, особенно к машиностроительным заготовкам. Расширение типоразмерных рядов металлопродукции связано с бурным развитием машиностроения из-за сокращения срока жизни машин. Современный прогресс в механической обработке на автоматических обрабатывающих центрах вынуждает металлургов уменьшать припуски на мехобработку, формировать предписанную структуру и свойства металла. Крупнотоннажное металлургическое производство узкосортamentной металлопродукции сохраняется далеко не для всех видов изделий. В листопрокатном, проволочном, рельсобалочном производствах при изготовлении труб нефтегазового сортамента высокая производительность и низкие требования к переналаживаемости оборудования сохраняются. Актуальными здесь являются автоматизация и устранение зависимости производительности агрегатов, количества металлоотходов и качества продукции от человеческого фактора. В случае же потребности в расширении сортамента, снижении объемов изготовления однотипной продукции, ужесточении требований к качеству, формировании особых физических и механических свойств за счет управления структурой и текстурой металла актуальными становятся многооперационность и быстрая переналаживаемость оборудования, пригодная для реализации новых технологических операций и приемов. Мини-металлургические производства невозможно организовать на морально старом оборудовании и с использованием оборудования и самой структуры крупнотоннажных производств. Приходится отказаться даже от прежних принципов проектирования технологий, оборудования и систем автоматического или автоматизированного управления. Легко понять, что если технология разрабатывается под

существующее оборудование с заведомо ограниченными технологическими возможностями, то она не может быть новой, а только несколько улучшенной. Следовательно, располагая известными типами и конструкциями оборудования, невозможно принципиально изменить способы обработки и полностью отказаться от известных, зачастую не оправдывающих себя технологических приемов. С другой стороны, если не придумана принципиально новая технология, то разработка нового оборудования направлена лишь на повышение производительности, повышение КПД, улучшение управляемости, снижение металлоемкости, но не на расширение технологических возможностей и не на реализацию принципиально иных, ранее неизвестных, схем обработки. В современных условиях заготовительные подразделения машиностроения и металлургические производства, занятые изготовлением металлопродукции с особыми физико-механическими свойствами, должны оснащаться оборудованием, проектируемым комплексно с разработкой новых технологий и систем управления. Таким образом, сегодня требуется изменение и структуры проектирования техники и технологий, в частности металлургического малотоннажного производства.

4. Проблемы экологической безопасности также заставляют менять подходы к разработке новых металлургических технологий и к проектированию оборудования для их реализации. В общей металлургии рано или поздно придется отказаться от углеродистых восстановителей. Часть первородных рудных материалов придется заменять техногенными отходами. Безотходность производства – основной принцип проектирования новых технологий в металлургии, даже если такие технологии требуют больших энергетических затрат. В технологиях обработки давлением необходимо уменьшать количество промежуточных нагревов под пластическую и термическую обработки, полностью избавляться от химической очистки металлов от окалина и окислов.

5. Спектр социальных проблем металлургической отрасли, как и всей промышленности, чрезвычайно широк и во многих аспектах существенно влияет на технологическое развитие. Так называемый «человеческий фактор» оказывается определяющим в назначении рационального уровня автоматизации производства.

Успешность неавтоматизированного производства зависит от квалификации персонала и от соблюдения им технологической дисциплины. Высоко автоматизированное производство с одной стороны снижает требования к профессионализму основного персонала, занятого выпуском продукции, с другой – повышает требования для специалистов, занятых обслуживанием систем управления. Во всех случаях развитие автоматизированного производства ведет к уменьшению количества рабочих мест и к усилению социальной напряженности на региональном уровне. Современные технические и программные средства автоматизации достаточны для полной замены человека в управлении технологическими процессами, в частности в металлургии. Такая замена всегда экономически целесообразна, поскольку исключает необходимость в обеспечении безопасных и безвредных условий работы персонала, упрощает и ускоряет проведение плановых регламентных работ на оборудовании, но создает трудноразрешимую проблему занятости. В итоге, вне зависимости от технологической целесообразности, приходится в каждом конкретном случае устанавливать рациональный уровень автоматизации производства, то есть вместо автоматических систем управления использовать автоматизированные системы.

6. Внешнеполитическая и внешнеэкономическая ситуация, в которой в настоящее время находится Россия, создает специфическую проблему в технологическом развитии, как всей отечественной промышленности, так и металлургического производства, касающуюся национальной безопасности. Бесспорна экономическая эффективность международной кооперации в совершенствовании техники и технологии, в создании новых современных производств, в обеспечении качества металлопродукции на мировом уровне. Однако кооперация для России опасна технической зависимостью от многих и далеко не всегда дружественных государств. Полное исключение зависимости от импорта в настоящую эпоху, скорее всего, невозможно, но частичное самообеспечение деформирующим инструментом, смазочными материалами, программными продуктами, средствами автоматизации и автоматическим механообрабатывающим оборудованием актуально, несмотря на неминуемое снижение эффективности производства и каче-

ства металлопродукции. Позиция зарубежных фирм в политике втягивания наших производителей в технологическую и техническую зависимость легко объяснима с экономической точки зрения. Приобретение импортного автоматизированного и надежного оборудования далеко не всегда соответствует современным и прогрессивным технологическим достижениям. Физически новое, но морально старое оборудование всегда соответствует вполне определенной технологической парадигме, выбраться из которой становится тем труднее, чем больше средств затрачено на приобретение оборудования и систем его автоматического управления. Чем больше объемы производства предприятия, тем труднее и затратнее смена этой парадигмы.

Создание мини-металлургических производств, конечно, не является панацеей от всех перечисленных проблем, но позволяет их частично разрешать, по крайней мере при организации выпуска высокотехнологичной продукции в сравнительно малых объемах. На этих предприятиях проще проводить техническое переоснащение, использовать сравнительно дешевые сырьевые ресурсы благодаря возможности размещения предприятий в непосредственной близости от исторически сформированных отвалов обогатительных фабрик и крупных металлургических предприятий, порой содержащих достаточно большое количество металлов.

В настоящей работе показан пример одного из подобных и ныне проектируемых предприятий, утилизирующих либо металлургическую окалину, либо техногенные образования (типа красных шламов глиноземного производства) и производящих проволоку и трубы из нестабилизированных коррозионно-стойких сталей аустенитного или ферритного классов. Естественно, что в рамках одной работы невозможно выполнить разработку и исследование всех элементов принципиально новой технологии, тем более что в проектируемом мини-металлургическом предприятии реализуются в едином технологическом потоке выплавка металла, его разливка и интенсивная горячая деформационная обработка. Поэтому направленность и объем представленных разработок и исследований соответствуют конкретной специальности – обработка металлов давлением. При

этом предпринимается попытка решить проблему третьего передела миниметаллургического производства, с целью предельно уменьшить металлоемкость оборудования, обеспечить его быструю и простую переналадку, расширить технологические возможности, показать реальную возможность автоматического управления температурно-скоростным режимом при совмещении таких на первый взгляд различных по динамике процессов как прессование и непрерывная прокатка.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ И ТРУБ В КЛЕТЯХ С МНГОВАЛКОВЫМИ КАЛИБРАМИ

1.1. Перспективы создания совмещенных агрегатов для производства прутков, профилей и труб

Как уже отмечалось во введении, изготовление широкоассортиментной продукции и металлоизделий с особыми физико-механическими свойствами целесообразно организовывать на мини-заводах или на специально созданных под выпуск этой продукции предприятиях или участках малотоннажного металлургического производства с полным циклом. Однако, чем меньше объемы производства, тем труднее достигается его рентабельность.

Исторически первым разработчиком концепции мини-заводов (адаптированных предприятий) в 50-х годах прошлого столетия является фирма «Danieli» (Италия) [1]. В разработанной концепции особое место уделялось проблемам энерго- и металлосбережения, уменьшения производственных площадей, металлоемкости основного оборудования, количества вспомогательного оборудования и быстрой инструментальной переналадке машин четвертого¹ металлургического передела. В решении проблем снижения энергоемкости идеологи концепции в первую очередь обращали внимание на совмещение металлургических переделов и операций, под которым понималось последовательное их выполнение без промежуточных нагревов, то есть с использованием тепла предыдущего передела. В дальнейшем понятие совмещения переделов и операций передела было расширено. К совмещенным стали относить процессы с частичным восполнением тепловых потерь (горячий посад заготовок). В рамках четвертого передела к совмещенным процессам обработки металлов давлением (ОМД) относят последовательно без промежуточного охлаждения и складирования выполняемые операции пластического формоизменения. Естественно, что любое совмещение, как переделов, так и их

¹По классификации Министерства СССР: 1-й передел – рудоподготовка; 2-й – выплавка металлов и сплавов; 3-й – литье заготовок; 4-й – деформационная горячая и холодная обработка; 5-й – отделка готовой металлопродукции

операций устраняет потребность во вспомогательном оборудовании нагрева, удаления окалины, транспортировки, обрезки концов, катаных полуфабрикатов. Если обработка одной заготовки проводится одновременно в двух или нескольких последовательно установленных разнотипных агрегатах, то такое совмещение называют прямым. Последнее эффективно по всем показателям, но наиболее трудно осуществимо и чаще всего невозможно без привлечения современных и надежных систем автоматического управления.

Несмотря на чрезвычайно большое количество публикаций о результатах разработки и исследований совмещенных процессов их промышленное использование крайне ограничено. Уже созданные агрегаты трудны в настройке и эксплуатации, требуют высококвалифицированного персонала и зачастую создают серьезную производственную и экономическую зависимость производителей металлопродукции от поставщиков оборудования.

В нашей стране совмещенные процессы используются редко, а агрегаты для этих процессов вообще не производятся и существуют только на уровне опытных или, в крайнем случае, опытно-промышленных образцов. В Советском Союзе приоритетным являлось крупнотоннажное металлургическое производство, а в современной России, несмотря на актуальную потребность в изготовлении высокотехнологичной продукции, совмещенные автоматизированные агрегаты не производятся по причине боязни любого производственного риска нынешних владельцев большинства промышленных предприятий. Наибольшие трудности возникают при разработке агрегатов и технологий совмещения металлургических переделов из-за отсутствия квалифицированных специалистов широкого профиля. Нет примеров совмещения рудоподготовки и плавки, выплавки и разливки, очень мало промышленно используемых агрегатов прямого совмещения литья с деформационной обработкой.

Наибольшее количество работ в этой области направлено на промышленную реализацию совмещения непрерывного литья сортовых заготовок на машинах радиального и горизонтального типов с сортовой и проволочной горячей прокаткой. Классификация способов криволинейной машины непрерывного литья за-

готовок (МНЛЗ) приведена, в частности, в работе [2]. Прямое совмещение непрерывного литья со скоростью 1,5...4,5 м/мин с обжимной группой клетей невозможно из-за неблагоприятного теплового режима прокатных валков при столь малой скорости прокатки. Если далее удалось бы напрямую совместить литье с обжимной прокаткой, то пришлось бы использовать одониточные МНЛЗ, которые в настоящее время не проектируются и не строятся, поскольку стоимость, металлоемкость, занимаемая производственная площадь и инфраструктура одно- и многопоточной машины почти одинакова, а производительность определяется количеством одновременно отливаемых заготовок. При совмещении в одном комплексе многопоточной МНЛЗ и сортопрокатного стана обязательна разрезка литых заготовок. В этом случае между литейной машиной и станом размещаются либо печь промежуточного подогрева, либо термостат. Проведенные расчеты [2] показывают, что схема с промежуточной печью представляет интерес для разработчиков, но экономия энергии незначительна, и даже ее реализация с промежуточным термостатом со встречным потоком горячих и холодных заготовок дает экономию энергии в пределах 10...15 %. Наиболее оптимальной, по мнению авторов [2], является схема состыковки установки непрерывной разливки стали (УНРС) и мелкосортного стана с применением длинномерной заготовки (до 120 м) и соответствующей высокотемпературной печи-термостата. Расчет расхода энергии по данной схеме совмещения показывает, что экономится 60 % тепла. В случае появления дефектных заготовок схемой предусматривается уборка их на холодильник. Этот способ совмещения литья с сортовой прокаткой авторы [2] считают наиболее эффективным. Подобная схема нашла широкое промышленное использование в литейно-прокатных агрегатах листовой прокатки [3].

Лидером в отечественных разработках совмещенных литейно-прокатных агрегатов для заводов малотоннажного металлургического производства является «ВНИИметмаш». Представляет несомненный интерес проект мини-завода производительностью от 50 до 100 тыс.т в год мелкого сорта с агрегатом прямого совмещения радиальной разливки и прокатки. По заключению авторов разработки [4] непосредственное совмещение МНЛЗ с прокатным станом в одном технологиче-

ском комплексе, по сравнению с питанием стана непрерывнолитой заготовкой через склад, обеспечивает экономию энергетических затрат, уменьшает массу технологического оборудования и площадь литейно-прокатного корпуса (за счет исключения склада заготовок со стеллажами, укладчиками, рольгангами и т.п., нагревательной печи с шагающими балками, механизмами загрузки и выгрузки, дутьевых устройств, дымовой трубы и др.), расширяет сортамент выпускаемой продукции, повышает выход годного проката и стабилизирует работу прокатного стана. Агрегат может быть построен в месте потребления металла, то обеспечивает значительное снижение себестоимости готовой продукции. Основной особенностью прямого совмещения МНЛЗ и стана в этом агрегате является проходная индукционная установка и применение малогабаритной черновой группы, в клетях которой валки-шайбы оказываются малочувствительны к неоднородным температурным полям при достаточно простой системе охлаждения.

В практике создания агрегатов прямого совмещения непрерывного литья и прокатки большой прогресс наблюдается в настоящее время в цветной металлургии [5], что оправданно на всех этапах развития малыми объемами производства и более широким марочным сортаментом цветных металлов и сплавов.

С целью стабилизации теплового режима литья заготовки напрямую или через проходящую печь, подаваемую к прокатному стану, целесообразно увеличивать сечение литой заготовки. Увеличенное сечение с одной стороны повышает производительность агрегата, с другой – увеличивает длину линии подогрева заготовок и число клетей прокатного стана. Последний разделяется на группы клетей с установкой между ними летучих ножниц, транспортных и задающих устройств. В итоге производственные площади и металлоемкость агрегатов значительно возрастают.

Эффективным техническим и технологическим мероприятием для компактирования оборудования и оперативного управления тепловым режимом обработки следует считать замену обжимных, черновых и даже предчистовых групп клетей прокатного стана агрегатами интенсивного обжатия циклического или непрерывного действия, к которым относят машины радиального обжатия, колебатель-

но-ковочные машины, прессовые установки, агрегаты прокатки-ковки, станы поперечной прокатки, планетарные станы продольной прокатки. Эти агрегаты в состоянии заменить по вытяжной способности большое количество прокатных клетей. Интенсивное обжатие дает возможность управлять тепловым режимом. Если позволяет пластичность металла, то непрерывно-литую заготовку без дополнительного подогрева после выравнивания температуры по сечению литой заготовки на теплоизолированной трассе ее передачи от зоны вторичного охлаждения МНЛЗ к деформирующему агрегату можно начать обрабатывать даже в захлажденном состоянии. Разогрев при интенсивном обжатии вполне достаточен для последующей горячей прокатки, например, в чистовых группах клетей. При постоянном обжатии в этом агрегате температура начала прокатки легко управляется изменением скорости разливки.

Первыми агрегатами интенсивного обжатия, нашедшими применение в сортовой прокатке, были радиально-ковочные машины [6]. Применение радиальной ковки вместо обжимной и черновой прокатки полезно и с точки зрения энергосбережения. Как показывает количественный анализ энергопотребления литейно-ковочно-прокатных агрегатов [7], энергетически выгодно прокатку полностью заменить ковкой. Однако по условиям формирования благоприятных структуры и текстуры металла, а также обеспечения нормальной работы литейной машины и производительности сечение литой заготовки должно быть достаточно большим, которое невозможно проковать до конечных размеров за один проход. Многосекционные ковочные блоки создают проблемы в скоростном и кинематическом согласовании движения бойков. В процессе реального проектирования литейно-ковочно-прокатных модулей для производства стальной катанки и сортовых профилей [8-9] установили, что рациональный эквивалентный диаметр литой заготовки составляет от 80 до 130 мм, а ковкой – от 20 до 40 мм. При таком распределении обжатий между ковкой и прокаткой целесообразно устанавливать трехсекционный ковочный и десятиклетевой непрерывный прокатный блок.

Установка машин интенсивного обжатия циклического действия особенно удобна между горизонтальной МНЛЗ и прокатным блоком [10-12]. Горизонталь-

ные литейные машины конструктивно просты, характеризуются малыми металлоемкостью и площадью размещения, что делает их пригодными для мини-металлургических предприятий. Их малая распространенность, особенно в черной металлургии, определена сложностью управления устройствами вытягивания слитка из кристаллизатора. Если на всех машинах вертикального и криволинейного типа устранение проварки со стенками кристаллизатора формирующейся корочки достигается осевым качением кристаллизатора, то на горизонтальных МНЛЗ эта операция заменяется осевой регламентированной отдачей слитка на каждом шаге его вытягивания. Последний легко реализуется по величине, определяя длительность пауз. Если радиальное обжатие выполняется во время пауз, то радиально-обжимные машины легко выполняют функцию отдачи слитка на каждом шаге вытягивания, предотвращая явления «бегущей волны».

Однако серийно выпускаемые радиально-ковочные машины (РКМ) непригодны для прямого совмещения с горизонтальными литейными установками из-за невозможности синхронизации частот вытягивания слитка и хода бойков. Все радиально-ковочные и радиально-обжимные машины, выпускаемые австрийской фирмой «GFM» и Рязанским заводом кузнечно-прессового оборудования осуществляют ковку с малыми единичными обжатиями при высокой частоте ударов. Удары бойков через заготовку передаются на узел стыковки кристаллизатора с промежуточным ковшем, разрушая его. Кроме того, при ковке требуется кантовка заготовки при ее передаче в бойки. Следовательно, появляется необходимость в разрезке литой заготовки и в установке перед ковочной машиной манипулятора, что резко повышает металлоемкость литейно-ковочного комплекса. Совмещение же РКМ с прокатным блоком вполне возможно и перспективно [13]. Фирма «GFM» выпускает различные агрегаты, в составе которых в зависимости от сортамента и требуемой степени деформации включены одно- или двухсекционные РКМ и необходимое количество прокатных клетей. Схема одного из таких агрегатов показана на рис. 1.1 [13].

Достаточно удачные конструкции РКМ, установленные в линии горизонтальной МНЛЗ, отливающей круглые слитки диаметром 130 мм и напрямую со-

вмещенной с блоком клеток непрерывной прокатки, разработали во «ВНИИметмаше». Перспективными в промышленном применении оказались ковочно-прокатные агрегаты фирмы «Roblin Steel» (США), имеющие в своем составе нагревательную печь, установку гидросбива окалины, двухсекционную РКМ, прокатную группу из семи клеток с консольными валками, летучие ножницы, холодильник.

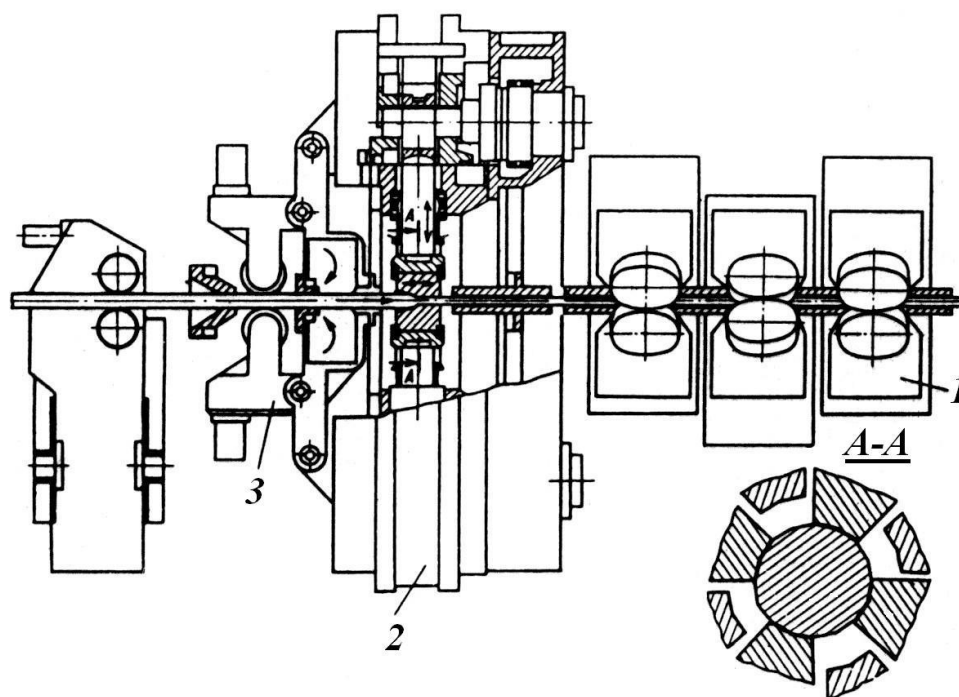


Рис. 1.1. Конструктивная схема ковочно-прокатного агрегата фирмы «GFM»:

1 – непрерывный блок клеток; 2 – восьмибойковая РКМ;

3 – подающее устройство

Из достоинств применения РКМ в составе ковочно-прокатных и литейно-ковочно-прокатных агрегатов и комплексов отмечают следующие [13]:

- в сравнении с обжимной и черновой прокаткой РКМ обеспечивает высокую степень обжатия. В односекционной РКМ вытяжка достигает 3,5, в двухсекционной – 10, что равноценно соответственно в четырех и восьми обычных клетях;
- высокая эффективность проработки структуры металла, что особенно важно при обработке непрерывно-литых заготовок;
- разогрев заготовки при ковке, что позволяет снижать исходную температуру нагрева заготовки;

– ковочно-прокатная группа в сравнении с обычным прокатным станом компактна и имеет существенно меньшую металлоемкость.

Известные недостатки обработки заготовок на РКМ снижают привлекательность ковочно-прокатных агрегатов, а также литейно-прокатных, в состав которых включены РКМ:

- значительный износ бойков;
- большие динамические нагрузки при высокой частоте ударов (до 780...900 мин⁻¹) способствуют быстрому износу элементов конструкции РКМ;
- необходимость в дополнительных подающих устройствах и механизмах подачи для доковки мерных заготовок;
- высокая неоднородность деформации по сечению заготовки при обработке металлов и сплавов с низкой теплопроводностью.

Установка в линии МНЛЗ и прокатных станов колебательно-ковочных машин (разработки: немецкая – «Kocks», американская – «Atlantik Steel», российская – «КОУрГТУ»), эксцентриковых клетей (немецкая фирма «Schloemann») и маятниковых клетей (разработка: немецкая «Demag», российская – «ВНИИметмаш») аналогична установке РКМ и обеспечивает ковочно-прокатным и литейно-ковочно-прокатным агрегатам те же технологические возможности.

Заслуживает внимания применение в качестве машины интенсивного обжатия непрерывно-литых заготовок, установленной в линии прокатки, стана планетарной прокатки [13-15]. Более 30 лет на заводе АО «Электросталь» работает созданный «ВНИИметмашем» совместно с заводом «Электросталь» и МГТУ им. Н.Э.Баумана литейно-прокатный агрегат с планетарным станом, в состав которого входят: плавильная печь, радиальная МНЛЗ, правильно-тянущее устройство, индукционная-проходная установка, сортовой планетарный стан, летучие ножницы, чистовая группа клетей и моталка.

Обжатие металла в планетарном стане производится в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, как это показано на рис. 1.2 [15].

Основным достоинством такого типа планетарной прокатки является возможность сверхвысокого обжатия за один проход с вытяжкой до 40. Прокатка ха-

рактикуется высокой дробностью деформации. Усилия, прикладываемые к рабочим валкам малого диаметра, сравнительно невелики, что позволяет прокатывать металлы и сплавы с повышенным сопротивлением деформации, в частности заохоложенный металл. Разогрев при обжати и настолько интенсивен, что дальнейшая сортовая прокатка не требует подогрева полосы.

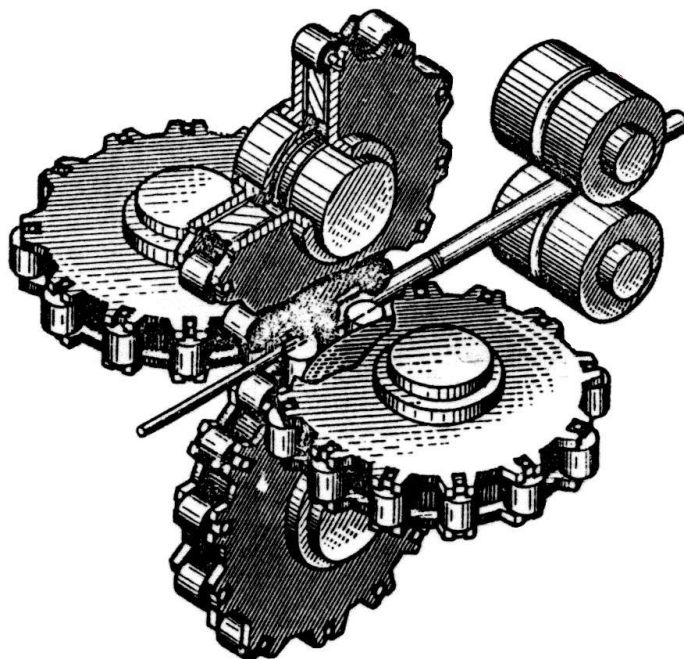


Рис. 1.2. Схема сортовой продольной планетарной прокатки

Применение планетарных клетей продольной прокатки целесообразно в составе однопоточных литейно-прокатных агрегатов небольшой производительности, предназначенных для выпуска продукции из высоколегированных сталей и сплавов. Широкому промышленному применению агрегатов с планетарным станом мешают выявленные в процессе эксплуатации недостатки. Для прокатки в планетарной клет и требуется достаточно мощное задающее устройство. Практически не представляется возможным осуществлять докатку в клет и заданных концов заготовки. Высокие динамические нагрузки не способствуют работоспособности оборудования.

В развитии техники и технологии совмещенных процессов в производстве мелкого сорта, проволоки и труб важное место занимают клет и поперечно-винтовой прокатки [13, 16-18]. Для поперечно-винтовой прокатки (ПВП) используются два вида клет и: стационарные, при обжати и в которых вращается заго-

товка, и вращающиеся, в которых без вращения заготовка движется в осевом направлении. Стационарные клетки, хотя и конструктивно проще, не применяются в совмещенных агрегатах. Вращающаяся клеть поперечно-винтовой прокатки (ПВП), конструктивное исполнение которой показано на рис. 1.3, пригодна для прямого совмещения как МНЛЗ криволинейного типа, так и с блоками прокатных клеток мелкосортного и проволочного стана.

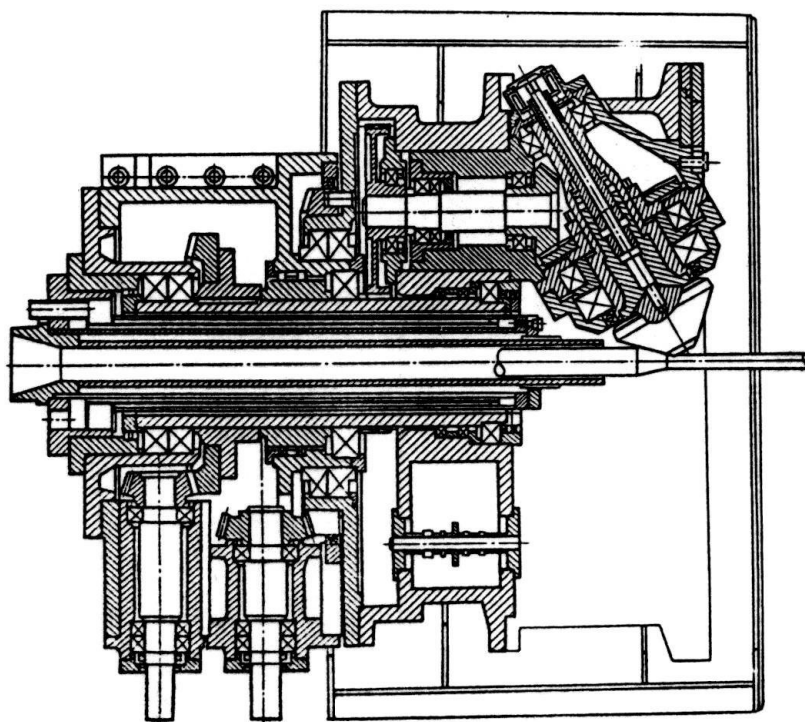


Рис. 1.3. Вращающаяся клеть поперечно-винтовой прокатки

Производителями подобных клеток являются немецкие фирмы «Schlосmann-Siemag», «Mannesmann-Demag», «Kabel und Metallwerke». В России основным разработчиком станов ПВП является АХК «ВНИИметмаш».

Вытяжка в клетях винтовой прокатки достигает семикратной величины [18], что улучшает температурный режим прокатки и уменьшает энергоемкость всего процесса производства сорта. За счет дополнительных сдвиговых деформаций при винтовой прокатке происходит более глубокая проработка структуры металла, что положительно сказывается на качестве металла. Совмещение винтовой и продольной прокатки значительно сокращает производственные площади и снижает металлоемкость оборудования. Все эти особенности станов ПВП делает их эффективными по многим технико-экономическим показателям. В настоящее

время они эксплуатируются в ряде стран, в частности Германия, Швеция, Япония, Италия. В России также производятся работы в этой области создания литейно-прокатных агрегатов и модулей [16].

В плане реализаций технологий совмещения переделов и операций в АХК «ВНИИметмаш» разработано несколько мини-мелкосортных комплексов с различной производительностью и широкой номенклатурой выпускаемой продукции [18], включающих МНЛЗ, индукционный подогреватель, толкатель, мини-стан, состоящий из клетки винтовой прокатки и двух клеток продольной прокатки, аварийные летучие ножницы, четырехклетевую чистовую группу, устройство термоупрочнения, холодильник. Как отмечают разработчики [18], такое совмещение непрерывного литья и прокатки позволяет исключить угар из-за повторного полного нагрева металла, снизить энергоемкость процессов благодаря эффективному использованию тепла предыдущего передела, сократить массу оборудования и занимаемые им производственные площади в результате исключения уборочных средств на МНЛЗ и участка загрузки и нагревательной печи перед прокатным станом.

Станы ПВП наиболее удачно вписываются в структуру совмещенных литейно-прокатных агрегатов. К их недостаткам можно отнести лишь сложное конструктивное исполнение и обслуживание, а также жесткую схему напряженного состояния и возможность осевого разрыхления металла заготовки, которое усугубляется последующей прокаткой с чередованием равноосных и неравноосных калибров, особенно в системах с малой вытяжной способностью. Стационарные же клетки ПВП малоприспособлены для использования в составе совмещенных агрегатов.

Среди машин интенсивного обжатия особое место занимают горизонтальные гидравлические прессы, на первый взгляд трудно встраиваемые в литейно-прокатные агрегаты. До сих пор нет сведений о промышленном использовании прессования в составе литейно-прессовых, так и прессово-прокатных агрегатов. В большинстве случаев прессование металлов и сплавов является нестационарным процессом, за исключением достаточно экзотичных методов совмещения процес-

сов литья-прессования, таких как «Conform» или «прокатка-прессование» [19, 20], где прессование является непрерывным.

Прессование, несмотря на многочисленные присущие только ему недостатки, является уникальным процессом ОМД, обеспечивающим возможность интенсивной пластической обработки любых металлов и сплавов вне зависимости от пластических характеристик. Достигаются чрезвычайно большие вытяжки за один переход, не достижимые в других способах деформирования. Неограниченно большой профильный сортамент, включающий полые профили обеспечивается при быстрой переналадке прессы заменой матриц, стоимость которых неизмеримо ниже стоимости любых других инструментальных наладок оборудования, пригодного для производства длинномерных изделий. При использовании в реальных техпроцессах прессования, конечно, нельзя не учитывать высокие контактные давления, тяжелые температурные условия работы прессового инструмента, неоднородность деформации по сечению пресс-изделий (особенно при прямом прессовании), непостоянство в цикле силы прессования, температуры пресс-изделия на выходе из матрицы, скорости истечения, а также сравнительно большое количество металлоотходов в пресс-остатках и концевой обрезки.

Примером использования прессования в технологии прямого совмещения горизонтальной непрерывной разливки металлов и сплавов с полунепрерывным прессованием может служить разработка «УГТУ-УПИ» совместно с ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов» литейно-прессового агрегата, схема которого приведена на рис. 1.4. [21].

Возможность использования прессования бесконечной непрерывной заготовки определена конструктивной особенностью прессовой установки, снабженной разъемным контейнером [22, 23].

Горизонтальная непрерывная разливка металла, в отличие от всех других способов литья, позволяет осуществлять процесс со сравнительно большим шагом вытягивания (практически на всю длину кристаллизатора). Горизонтальные литейные машины конструктивно просты, отличаются малыми металлоемкостью и габаритами, позволяют достаточно быстро переналаживаться при переходе с

одной марки сплава на другую. Главным недостатком этих машин является необходимость регламентированной отдачи слитка в сторону кристаллизатора после каждого шага вытягивания для предотвращения разрывов корочки и прорывов металла на выходе из кристаллизатора (так называемый эффект «бегущей волны»). Вторым недостатком горизонтального литья с большим шагом вытягивания следует считать появление на слитке «спаев» шагов, представляющих собой поперечные неслитины, которые при последующем охлаждении литой заготовки зачастую превращаются в трещины.

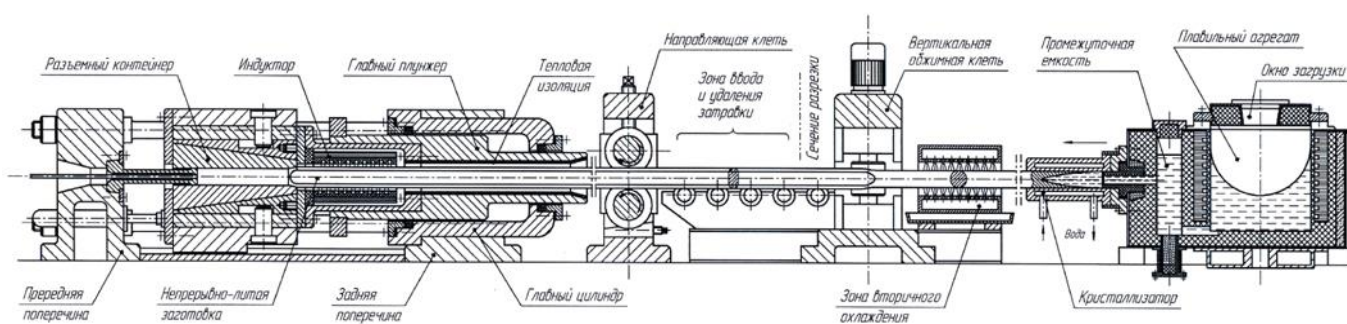


Рис. 1.4. Схема литейно-прессового агрегата для производства прутков

Оба эти недостатка нивелируются при прямом совмещении горизонтального литья с полунепрерывным проходным обратным прессованием. В состав комплекса оборудования для осуществления технологии литья-прессования входят (рис. 1.4):

- индукционная плавильная печь с электромагнитным перемешивателем, имеющая дополнительную емкость, связанную с плавильной камерой донным металлопроводом; в стенке дополнительной емкости монтируется традиционным способом медный водоохлаждаемый кристаллизатор;
- зона вторичного охлаждения;
- обжимная прокатная клетка;
- устройство газовой резки (для отделения затравки и переднего конца слитка);
- транспортный рольганг;
- направляющая подающая клетка;

– модифицированный горизонтальный трубопрофильный пресс с разъемным контейнером.

Горизонтальный трубопрофильный пресс традиционной конструкции для использования в агрегате подвергается определенной реконструкции. Удаляется прошивная система и освобождается сквозной канал главного плунжера. В матрицедержатель монтируется шплинтон с матрицей для обратного прессования. Контейнер пресса делается разъемным с удлиненной рабочей полостью – 3,5...4,0 диаметра контейнера. Для сведения секторов разъемного контейнера предусматриваются клинья, закрепляемые на главном плунжере. В передней неподвижной поперечине устанавливаются гидроцилиндры для удержания контейнера при вводе и извлечении клиньев. В корпусах секторов монтируются короткоходовые гидроцилиндры для разведения секторов, напрямую связанные с гидросистемой ретурных цилиндров. В корпусе контейнера устанавливаются ограничители хода клиньев.

При начале разливки электромагнитный перемешиватель, установленный под днищем плавильной емкости печи, формирует мениск и поднимает расплав по стенкам плавильной и дополнительной емкости (по принципу сообщающихся сосудов). Металл при этом подается в кристаллизатор, где установлена затравка. Роль вытяжного устройства на первых шагах разливки выполняет обжимная прокатная клеть. На входе на транспортный рольганг во время очередной паузы на кристаллизацию металла затравка вместе с передней захлажденной частью слитка отрезается и удаляется с машины.

В процессе пошагового вытягивания обжимная клеть преобразует круглое сечение слитка в плоскоовальное сечение прессовой заготовки. Пусковой режим заканчивается при входе передней части слитка в разведенные секторы контейнера. При этом главный плунжер и контейнер находятся в крайнем заднем положении. Заготовка подается в осевом положении, когда большая ось ее плоскоовального сечения перпендикулярна плоскости разъема контейнера. Гидроцилиндры передней поперечины пресса удерживают контейнер от движения вперед. Ходом вперед главного плунжера вводятся клинья, и смыкающиеся секторы контейнера

радиально обжимают поданную часть заготовки. Осевая отдача слитка при радиальном обжатии восстанавливает целостность корочки металла в кристаллизаторе. Плоскоовальное (при двухсекторном контейнере) и квадратное сечения (при четырехсекторном исполнении) предотвращают затекание металла в разъем секторов. После полного смыкания секторов и практически полном заполнении металлом сечения полости контейнера торцевая полость гидроцилиндров передней поперечины открывается на слив и контейнер вместе с зажатой заготовкой движется под действием главного плунжера в сторону шплинтон с матрицей. В этот период осуществляется вытягивание слитка из кристаллизатора и прессование с обратным истечением, если к этому моменту контейнер полностью заполнен металлом. Ход прессования, следовательно, совпадает с шагом вытягивания. По завершении цикла прессования ретурные цилиндры возвращают главный плунжер, который первоначально извлекает клинья, освобождая сектора, а затем, после открытия штоковой полости удерживающих цилиндров, переводит контейнер в исходное положение. Далее цикл прессования повторяется.

Совмещенный процесс литья-прессования не предполагает подогрева заготовки на трассе передачи слитка от МНЛЗ к прессу. При входе во вторичную зону охлаждения средняя температура слитка превышает температуру прессования. Управление интенсивностью охлаждения поверхности литой заготовки в зоне вторичного охлаждения устанавливает вполне определенный градиент температуры между центром и поверхностью слитка. Длина трассы подачи и условия теплоотдачи в окружающую среду подбираются таким образом, что после выравнивания температуры по сечению слитка она соответствует температурному интервалу прессования.

Достоинствами описанного технологического варианта при производстве сплошных профилей из алюминия и низколегированных алюминиевых сплавов, не требующих гомогенизационного отжига, являются:

- возможность получения длинномерных или бесконечномерных профилей;
- снижение металлоотходов с пресс-остатками и отрезанными концами профилей;

- возможность использования моталок, одновременно выполняющих функцию натяжных устройств;
- повышение производительности и снижение трудозатрат.

Возможно иное конструктивное исполнение реконструированной прессовой установки, при котором слиток подается со стороны передней поперечины, а пресс-изделие выводится через полость главного плунжера (рис. 1.5).

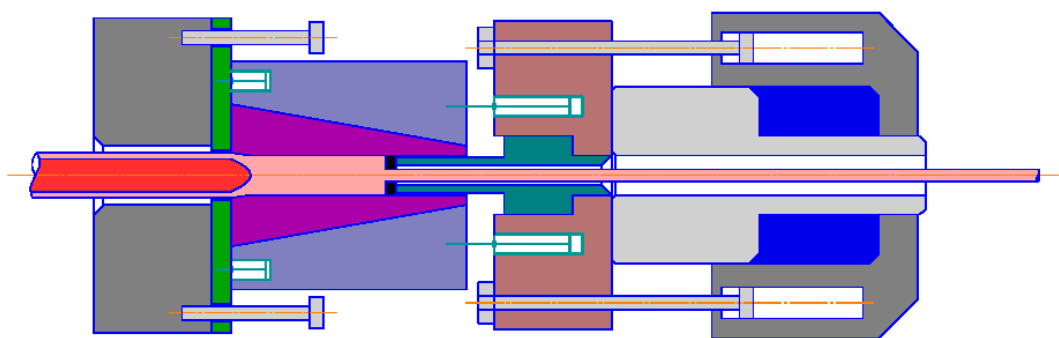


Рис. 1.5. Конструктивное исполнение пресса, при котором подача литой заготовки осуществляется через переднюю поперечину

Используя технологию горизонтального непрерывного литья полых заготовок и применяя оправку, являющуюся продолжением литейного дорна, можно организовать производство длинномерных труб и полых профилей.

В случае совмещения полунепрерывного прессования мерных заготовок с сортовой прокаткой формирование петли между прессом и станом является обязательным, поскольку прессование процесс циклический, а прокатка – непрерывный [24]. Размер петли определяет температурно-скоростные условия работы всего комплекса. На рис. 1.6 показан технологических план размещения оборудования литейно-прессово-прокатного комплекса, разработанный в рамках ГНТП «Ресурсосберегающие экологически безопасные процессы горно-металлургического производства».

Стальной расплав из плавильного агрегата подается в промежуточный ковш 1 горизонтальной МНЛЗ. Формирование круглой заготовки диаметром d осуществляется в кристаллизаторе 2, из которого она периодически вытягивается устройством 3 с шагом L . При этом на кристаллизацию очередной порции метал-

ла в кристаллизаторе затрачивается время $\tau_{\text{п}}$, а на вытягивание – $\tau_{\text{в}}$. Заготовка, проходя зону вторичного охлаждения 4, затвердевает по всему сечению, сохраняя существенный градиент температуры от центра ($1400...1500^{\circ}\text{C}$) к периферии ($850...1050^{\circ}\text{C}$). Для выравнивания температуры по сечению заготовка проходит индукционную печь 5. На входе в прессовую установку 6 температура заготовки соответствует температурному интервалу прессования.

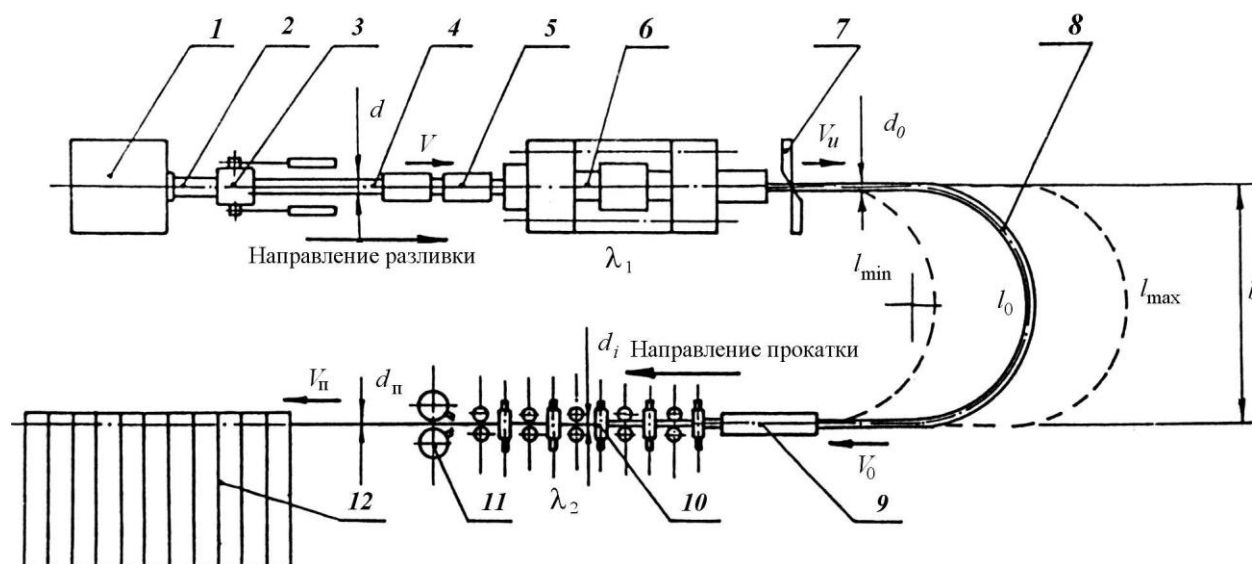


Рис. 1.6. Технологический план литейно-прокатного комплекса:

- 1 – промежуточный ковш; 2 – кристаллизатор; 3 – вытяжное устройство;
- 4 – зона вторичного охлаждения; 5 – устройство стабилизации температуры литой заготовки;
- 6 – пресс; 7 – ножницы; 8 – петлеобразователь; 9 – устройство для нагрева изделия;
- 10 – непрерывный прокатный блок; 11 – летучие ножницы; 12 – холодильник

Прессование, производимое без разрезки литой заготовки из разъемного контейнера обратным способом (см. рис. 1.5), позволяет получить качественную заготовку диаметром d_0 для последующей прокатки. После удаления переднего конца отпрессованного прутка ножницами 7 заготовка через петлевое устройство 8 подается на линию прокатки.

Температура начала прокатки зависит от условий проведения прессования и способа передачи металла с прессы на прокатный блок. Даже при неизменном темпе разлива сохраняется возможность в достаточно широком диапазоне варьировать скорость прессования и, следовательно, температуру прессованных изделий. Кроме того, совместное управление прессом и прокатным блоком позволяет

оперативно изменять длину петли, за счет которой циклическое прессование согласуется по скорости с непрерывной прокаткой.

Полоса в промежутке между прессом и прокатным блоком непрерывно изменяет свою длину от некоторого значения l_{\min} , определяемого технологической планировкой оборудования комплекса и условиями надежной передачи полосы на прокатку (например, $l_{\min} = \pi b / 2$), до l_{\max} . Максимальная длина петли не является постоянной величиной и при фиксированной вытяжке и согласованной с разливкой скоростью полосы на входе в прокатный блок V_0 может варьироваться в достаточно широком диапазоне изменением скорости прессования V_g .

При конструктивно заданной минимальной длине петли l_{\min} положение направляющих обводного аппарата конкретизируется номинальным размером петли l_0 , который определяется:

$$l_0 = l_{\min} + V\lambda_1\tau_{\pi},$$

где λ_1 – вытяжка при прессовании; $V = \frac{V_g}{k+1}$ – средняя скорость разливки;

$$k = \tau_{\pi} / \tau_{\text{в}}.$$

В процессе работы комплекса λ_1 остается величиной практически неизменной, но при переходе с одного типоразмера катаного профиля на другой вытяжка при прессовании подбирается, исходя из рационального значения λ_2 и размера сечения литой заготовки. Максимальная длина петли l_{\max} определяется выражением:

$$l_0 = l_{\max} + V\lambda_1\tau_{\pi}(1+k).$$

На реальную величину l_{\max} оказывает влияние соотношение k между длительностями паузы при разливке и вытягивании заготовки. Повышение скорости прессования при неизменной V означает рост k и, следовательно, увеличение максимальной длины петли.

Особенности технологического проектирования для подобного непрерывного комплекса определены необходимостью жесткого скоростного согласования всех последовательно установленных агрегатов и совместного решения тепловых задач непрерывной разливки, прессования и непрерывной прокатки.

Контроль температуры деформируемого металла при проектировании осуществляется либо с непрерывной разливки, либо с момента входа литой заготовки в контейнер прессы, так как деформация в основном проводится с использованием тепла литейного передела.

При расчете температуры металла перед входом полосы в прокатный блок следует использовать графики зависимости минимального времени τ_0 нахождения полосы в компенсационной петле от шага вытягивания L соотношения $k = \tau_{\text{п}} / \tau_{\text{в}}$. Графическое представление вариации $\Delta\tau = \tau_{\text{max}} - \tau_0$ помогает быстро определить для указанных условий максимальное время охлаждения и, следовательно, минимальную температуру прессованной полосы перед входом в прокатный блок.

С появлением так называемых бесстанинных компактных сортопрокатных клетей, объединяемых в малогабаритные группы и блоки, непрерывную прокатку в обжимных и черновых группах таких клетей стали относить к процессам интенсивного обжата [13, 25, 26], поскольку при равной вытяжке группы и блоки занимают производственные площади не больше, чем иные агрегаты, заменяющие обжимную прокатку. Бесстанинные клетки в настоящее время выпускаются многими зарубежными фирмами: «Sket» и «SMS» (Германия), «Danieli» и «Pomini» (Италия), «Kocks» (США) и др. Основными достоинствами бесстанинных клетей являются следующие [26]:

- клетки могут использоваться для установки, как в горизонтальном, так и в вертикальном положении;
- уменьшение массы клетки на 15...30 % в сравнении с аналогичными клетями традиционной конструкции;
- возможность предварительного напряжения клетей и оптимальное распределение нагрузки на опоры валков;
- повышенная жесткость клетей;
- быстрая смена валков и самих клетей.

В качестве примера на рис. 1.7 показана конструкция бесстанинной клетки фирмы SMS с двухопорной установкой валков.

Клеть имеет высокую жесткость (до 7200 кН/мм) и может с помощью люнетов устанавливаться как в вертикальном, так и горизонтальном положении. Консольные клетки, например, фирмы «Danieli» имеют более компактное исполнение привода, но проигрывают в жесткости и в предельно допустимых нагрузках.

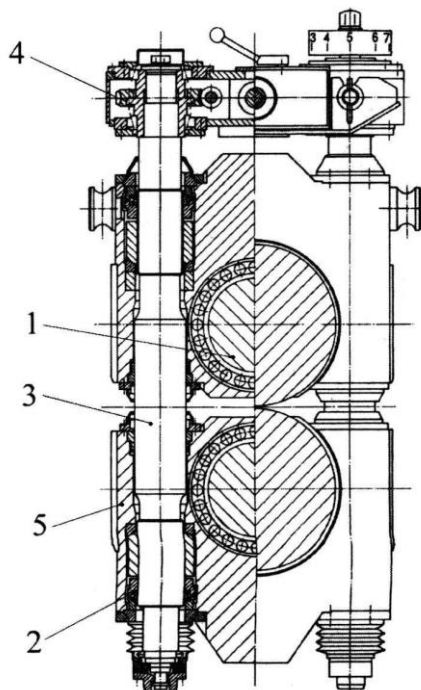


Рис. 1.7. Бесстанинная прокатная клеть фирмы «SMS»:

1 – валок; 2 – сферическая шайба; 3 – нажимной винт; 4 – нажимное устройство; 5 – подушка

С точки зрения снижения металлоемкости прокатного оборудования, производящего мелкосортную и проволочную продукцию, дальнейшее совершенствование конструкций клетей, с целью уменьшения их массы и габаритов неэффективно из-за сохранения громоздкого электромеханического привода (рис. 1.8).

Четырех- и шестиклетевые малогабаритные блоки бесстанинных клетей стали устанавливать в качестве черновых групп сортовых станов и литейно-прокатных агрегатов [25] еще в 80-х годах прошлого века. Лидерами в создании этой техники и технологии обжимной прокатки в малогабаритных блоках были фирмы «Morgan» (США) и «Morgardschammer» (Швеция). Прокатка во всех клетях кроме первой ведется с принудительной задачей металла предыдущими клетями при углах захвата до 45 % и обжатию до 48 %. Это становится возможным благодаря малым межклетевым промежуткам, исключаяющим потерю устойчивости полосы. Высокая вытяжная способность, простота конструкции и обслужива-

ния, малая металлоемкость делают компактные блоки более перспективными, чем планетарные станы, радиально-ковочные и прокатно-ковочные машины. Дробность деформации и естественно возникающие паузы между единичными обжатиями способствуют развитию динамического разупрочнения металла. Это уменьшает энергопотребление и текстуробразование.

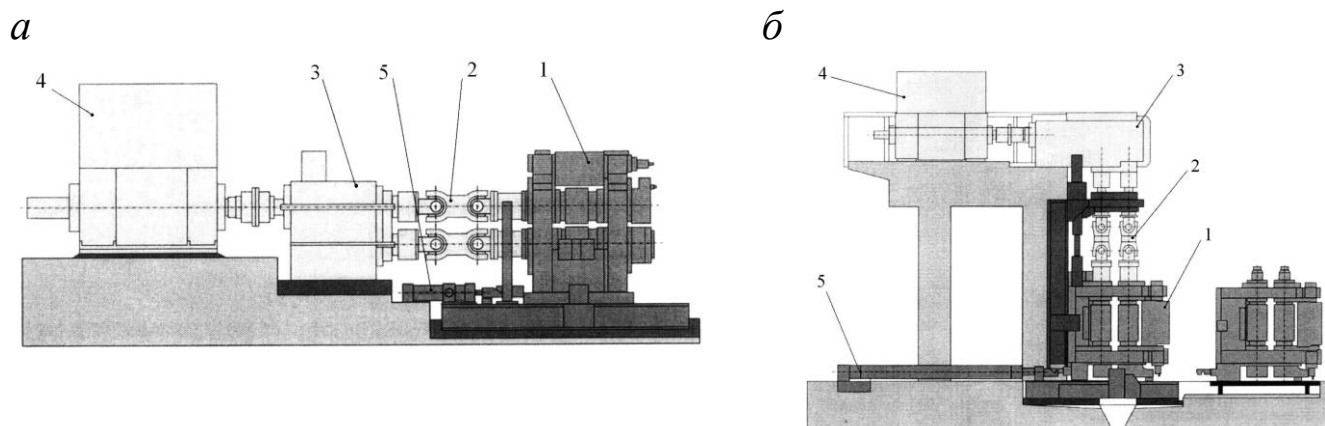


Рис. 1.8. Установка прокатной клетки с горизонтальным (а) и вертикальным (б) расположением валков фирмы «Sket»:
1 – прокатная клетка; 2 – шпиндели; 3 – шестеренная клетка;
4 – электродвигатель; 5 – устройство перевалки

Бесстанинные малогабаритные клетки позволяют эффективно применять предварительное напряжение, что важно для чистовых групп клетей сортовых и проволочных станов. Перспективные компактные предварительно напряженные клетки разработаны «ВНИИметмашем» и использованы при проектировании нового цеха Норильского горно-обогатительного комбината [15].

Существенного снижения массы черновых групп малогабаритных клетей можно добиться последовательной установкой клетей без чередования, а кантовки осуществлять за счет конических валков, как это предложено в а.с. № 373039 СССР. Полоса прокатывается в валках с углом наклона образующей к оси валка 45^0 (рис. 1.9) [27]. В следующей по ходу клетки обжимаются две другие стороны полосы.

В области производства горячекатаных бесшовных труб успехи в создании техники и разработке технологий совмещения металлургических переделов и операций отдельных переделов значительно скромнее, чем при приготовлении прутков, профилей и проволоки. В первую очередь, это связано с существующи-

ми и широко применяемыми технологиями изготовления полых заготовок. Чаще всего исходной трубной заготовкой является горячекатаный или непрерывнолитой пруток круглого поперечного сечения. Заготовки прошиваются либо на прошивных косовалковых станах, либо на гидравлических прессах. Это сразу исключает возможность совмещения процессов производства сплошных цилиндрических заготовок и их прошивки. Когда при производстве труб специального назначения отверстие в катаных заготовках выполняется сверлением и расточкой, то ни

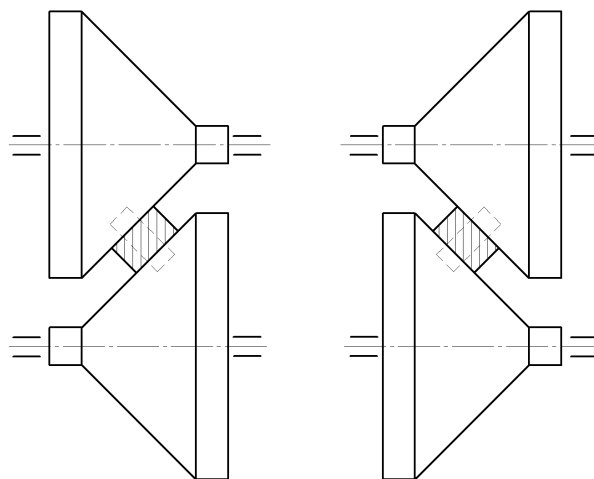


Рис. 1.9. Схема прокатки без кантовок и чередования клеток

о каком совмещении литья, прокатки и механической обработки говорить не приходится. Литые полые трубные заготовки, изготавливаемые либо центробежным литьем, либо отливкой вверх из герметичного ковша в водоохлаждаемый кристаллизатор, либо методом намораживания на полый водоохлаждаемый кристаллизатор, после извлечения из литейной машины охлаждаются и подвергаются механической обработке. Поэтому дополнительный нагрев заготовок перед последующей прокаткой неизбежен.

Попытки создания комплексов для малотоннажного производства труб с использованием принципов совмещения переделов и операций все же предпринимаются.

«ВНИИметмаш» разработал литейно-прокатный комплекс по производству труб производительностью 100 тыс. тонн в год [28], в котором предусмотрены современные технологические решения, обеспечивающие экономическую целесо-

образность создания металлургического производства при сравнительно малой производительности:

- непрерывное литье;
- бесшовные горячедеформированные трубы широкого назначения производятся в едином технологическом потоке с использованием тепла трубной заготовки после МНЛЗ;
- в зависимости от сортамента устанавливается агрегат с раскатным станом;
- технические системы дают возможность прокатывать трубы из заготовок одного диаметра с различной после редуционного стана и обеспечивает большую маневренность агрегата, широкий сортамент, минимальное энергопотребление и капитальные затраты и расходы по переделу.

Комплекс, спроектированный для установки в Мурманской области, предназначен для изготовления бесшовных горячекатаных труб диаметром 32...114 мм с толщиной стенки 3,0...8,0 мм из углеродистых и низколегированных сталей.

В работе [29] отмечается, что, несмотря на большое количество НИР, до сих пор не освоена ни одна технология получения непрерывнолитой полый стальной заготовки для изготовления труб. Предлагается два технологических варианта совмещения литья и трубoproкатки. В одном способе используется непрерывная, например криволинейная, разливка металла на трубчатом имплантанте и реализация больших разовых деформаций при прошивке-прокатке в пространственно-замкнутых калибрах (а.с. №919217 СССР). МНЛЗ снабжена разматывателем свернутой в рулон тонкостенной сварной трубы. Из разматывателя труба направляется в кристаллизатор и жидкая сталь из промковша заполняет пространство между наружной поверхностью имплантированной трубы, формирующей полость в заготовке, и стенками кристаллизатора. Через трубу-имплантатор прокачивается охладитель. Во втором способе МНЛЗ снабжена горизонтальным кристаллизатором, в который подается тонкостенная водоохлаждаемая труба из формовочно-сварочного стана. Труба перед кристаллизатором проходит через емкость с расплавом, подвергаемым электромагнитному перемешиванию. В кристаллизаторе

на трубу намораживается слой металла, а полая заготовка после выхода из кристаллизатора направляется в черновые редуccionные клетки с пространственно-замкнутыми калибрами.

Однако оба способа совмещенного непрерывного литья полый заготовки и горячей прокатки труб не опробованы даже на опытных установках. Можно ожидать множество технических проблем и большого объема дополнительных исследований при разработке промышленно пригодных технологий изготовления стальных труб.

Из представленного обзора современных технологий, совмещающих в едином потоке различные переделы и этапы деформационной обработки, следует перспективность их применения на мини-металлургических производствах с широкой номенклатурой металлоизделий. Для крупнотоннажного выпуска однотипной продукции совмещение операций не столь актуально, поскольку приемлемая рентабельность производства достигается за счет больших объемов выпуска продукции.

Наиболее привлекательны, но не всегда реализуемы технологии прямого совмещения переделов и операций. Именно для них характерны все перечисленные в работе [5] достоинства процессов совмещения, в частности реализуемых на литейно-прокатных агрегатах:

- исключение из состава оборудования громоздких и дорогостоящих МНЛЗ и обжимных прокатных агрегатов, вследствие чего повышается выпуск продукции на тонну массы оборудования;
- исключение повторных нагревов или даже подогревов металла, в связи с чем отпадает необходимость в нагревательных печах и в дополнительных производственных площадях для промежуточных складов; существенное энергосбережение;
- повышение выхода годного за счет исключения операции разрезки слитков, нагрева их перед прокаткой; возможна организация безотходных технологий;
- стабильность показателей качества выпускаемой продукции благодаря стабилизации температурно-скоростных и деформационных режимов обработки;

- значительное снижение аварийности на прокатных станах, возникающей обычно при прохождении передних концов полосы через проводковую арматуру и клетки;
- улучшение условий труда обслуживающего персонала.

Отмечается [5] также важная отличительная особенность работы литейно-прокатного агрегата прямого совмещения – обработки одной непрерывной полосы. С одной стороны, это снижает производительность и исключает эффективного применения многопоточных МНЛЗ. С другой стороны, отпадает необходимость решать сложные вопросы прокатки: обеспечение стабильности прохождения передним концом полосы межклетевых промежутков, создание клеток повышенной жесткости для компенсации переменного давления металла на валки при многониточной прокатке в моменты входа и выхода отдельных ниток.

В мировой практике прокатного производства известны [26] варианты осуществления бесконечной одониточной прокатки сортовых профилей из непрерывно-литых заготовок, получаемых на многониточных МНЛЗ криволинейного типа. Разработанный «Danieli» совместно с фирмой «Esal» (Швеция) процесс бесконечной прокатки сварных заготовок позволяет увеличить производительность, стабилизировать качество, снизить объем металлоотходов и издержки производства. Сварочная машина, установленная на приводной тележке, позволяет осуществлять последовательно выдаваемые из печи сортовые заготовки. На выходе из печи ее передний конец очищается от окалины и при помощи стыковочной машины оплавлением приваривается к заднему концу предыдущей заготовки, которая в это время уже прокатывается в черновых клетях стана. Зажимные устройства имеют систему охлаждения и гидропривод. В ходе стыковой сварки сначала происходит нагрев торцов двух заготовок до их оплавления, а затем производится их сварка путем прижатия друг к другу с большим усилием. Сварочные машины, как правило, оснащаются ножевыми устройствами зачистки грата.

Если речь идет о создании хотя и малотоннажного, но широкоассортиментного производства и о возможности без реконструкции наращивать объемы выпуска продукции целесообразно использовать модульные принципы создания и размещения оборудования. В этом случае под модулем понимается совокупность обо-

рудования, достаточная для полной реализации технологии изготовления конкретного вида продукции. Модули, каждый из которых имеет сравнительно низкую производительность, могут быть рентабельны только в случае низкой металлоемкости, при высоком уровне автоматизации и предельно низкой энергоемкости технологии, реализуемой на каждом модуле. Следовательно, принципы совмещения переделов и операций должны быть положены в основу разработки простых, компактных и быстроперенастраиваемых модулей. Каждая единица оборудования в составе модуля должна быть максимально управляема и пригодна для обработки материалов при широком как марочном, так и типоразмерном сортаменте продукции.

Идеальный мини-металлургический модуль, пригодный для использования, как в черной, так и цветной металлургии, а также для производства малопартионной продукции из спечсплавов с особыми физико-механическими свойствами представляется в следующей конфигурации. Прежде всего, целесообразно совмещение плавильного и литейного переделов, причем плавильный агрегат сравнительно малого объема пригоден для переплавки лома, проведения восстановительных плавов и выполнения всех операций рафинирования расплавов, которые в современной металлургии осуществляются в АКЭС или печь-ковшах. Плавильный агрегат оснащен дополнительной емкостью, выполняющей функцию промежуточного ковша МНЛЗ и пригодную для осуществления разливки как сплошных, так и полых заготовок, соответственно для сортовой и трубной, например, редуцированной прокатки. В состав модуля должен входить какой-либо агрегат интенсивного обжата, исключаяющий необходимость установки обжимных и черновых групп клетей. Единственным из таких агрегатов, пригодным для получения сортовой и трубной заготовок, является горизонтальный трубопрофильный пресс. Быстрая смена матриц позволяет легко переходить от одного типоразмера заготовки к другому под последующую чистовую прокатку. Сортамент как сплошных, так и полых заготовок практически не ограничен. Блок чистовых сортовых или редуцированных клетей должен быть компактен и пригоден для установки на выходе прессы, а его система управления должна обеспечивать скоростное согла-

сование с прессом и клетей между собой в непрерывной группе. Модуль низкой производительности вряд ли будет самокупаем в традиционном конструктивном исполнении, то есть с громоздким и дорогим электромеханическим приводом прокатных клетей. Здесь положение не спасают даже лучшие бесстанинные предельно компактные клетки. При индивидуальном частотном управлении приводами клетки, стоимость только системы управления скоростным режимом соизмерима со стоимостью всего модуля.

Конкуренцию электроприводу составляет гидропривод. Если возможно создание компактных гидромоторов для установки на прокатные клетки, то привод может быть безредукторным и бесшпиндельным, следовательно, предельно компактным. Гидроприводные прокатные блоки целесообразно устанавливать в модуле, включающем гидравлический пресс, работающий от насосно-аккумуляторной станции (НАС). Если в цехе несколько модулей, то коллективное использование НАС мало влияет на металлоемкость и окупаемость каждого модуля.

Если нет в модуле четвертого передела, то и нет модуля. Поэтому создание совмещенного агрегата прессования-прокатки для встраивания в мини-металлургический модуль является принципиальным; разработка схемы его конструктивного исполнения и технологии прокатки на этом совмещенном агрегате посвящается настоящая работа. В следующем разделе рассматривается разрабатываемый совместно с ОАО «Дата-Центр», ООО «Компания ИнМехМаш», ОАО НПО «Уральские технологии» и «УГТУ–УПИ» мини-металлургический модуль для изготовления горячекатаных заготовок дистанционирующей проволоки и теплообменных труб для атомной энергетики.

1.2. Актуальная проблема производства проволочной заготовки и труб

из коррозионно-стойких сталей для атомной энергетики

Мини-металлургическое производство заготовки для дистанционирующей проволоки и теплообменных труб ядерных реакторов, разрабатываемое в настоящее время на уровне технологического задания и проектирования нестандартного оборудования, является типичным примером малотоннажного высокотехнологического производства. Высокие эксплуатационные свойства по стойкости к межкристаллитной коррозии и распуханию под воздействием жесткого нейтрального облучения труднодостижимы в крупнотоннажном производстве и по крайней мере экономически нецелесообразны.

Важнейшим показателем эксплуатационных свойств нержавеющей сталей аустенитного и ферритного классов является стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК), которая в основном определяется содержанием углерода в сталях. Склонность к МКК появляется при образовании по границам зерен аустенита или феррита карбидов Cr_{23}C_6 . Для аустенитных сталей температурный интервал карбидообразования $450 \dots 750^\circ\text{C}$, для ферритных – выше 1000°C . Процесс образования карбидов самопроизвольный и начинается, как только металл попадает в указанный интервал температур. Поэтому контроль сталей на склонность к МКК осуществляется после провоцирующего нагрева при 650°C в течение одного часа для аустенитных сталей и после высокотемпературного нагрева для сталей ферритного класса (1100°C в течение 30 мин с последующим охлаждением в воде).

В современной металлургии практикуются два метода снижения склонности к МКК нержавеющей сталей:

- предельно возможное снижение концентрации углерода в стали;
- дополнительное легирование стали карбидообразующими элементами (Ti, Nb, Ta, Zr, W, V), имеющими большее сродство к углероду, чем хром.

Поскольку при восстановлении железа из руд преимущественно используется углерод, последующее избавление от него трудоемко и не всегда успешно. Наиболее эффективными технологическими приемами считаются конвертирование (продувка кислородом), ввод в железный расплав руды или окислы, продув-

ка аргоном, вакуумирование. Это позволяет снизить концентрацию углерода до 0,03...0,02 % и ниже. Однако содержание углерода увеличивается при вводе в расплав даже низкоуглеродистого феррохрома. Легирование чистым хромом дорого и трудноосуществимо из-за необходимости активного перемешивания расплава. Низкоуглеродистая нержавеющая сталь называется нестабилизированной. В настоящее время она производится предприятиями, располагающими технологиями аргонной и вакуумной обработки расплавов.

Наиболее распространенной отечественной технологией производства аустенитных и ферритных нержавеющих сталей является легирование карбидообразующими элементами, называемое стабилизацией. В производстве стабилизированных сталей трудно добиться однородности. Образующиеся карбиды и карбонитриды титана или ниобия не позволяют при любых видах деформационной обработки получать особо чистую поверхность металлоизделий. Особенно опасна титановая неоднородность, затрудняющая получение тонкостенных труб и тонких листов из-за большого количества концентраторов напряжения. Следовательно, для снижения склонности к МКК следует производить нестабилизированные стали, если удастся при этом окупить затраты на производство. Применение дешевого углеродистого феррохрома оставляет возможность выплавки лишь стабилизированных нержавеющих сталей. Следует иметь в виду, что влияние азота на склонность к МКК ферритных сталей аналогично углероду, что следует учитывать при организации техпроцесса производства металлоизделий и, в частности, труб. Для нестабилизированных аустенитных сталей азот не опасен и может вводиться до 0,2 % для повышения прочности без существенного снижения пластичности.

В традиционной технологии изготовления труб из коррозионно-стойких сталей, в частности для атомной энергетики, практически все переделы включают факторы, снижающие качество металлопродукции и не оправданно удорожающие производство.

Плавка и литье сплошных заготовок не позволяют получать слитки однородные по составу и структуре. Косовалковая или прессовая прошивка заготовок

из нержавеющей стали характеризуется рваной внутренней поверхностью трубной заготовки, требующей для выглаживания интенсивной холодной деформации. Получение качественной полой центробежно-литой заготовки возможно лишь на литейных машинах с герметизируемым рабочим пространством, поскольку литье открытой струей и послойное намораживание слитка в изложнице без специальной газовой защиты способствуют поражению заготовки глубоко залегающими окислами и нитридами.

Последующая интенсивная с чрезмерно большими вытяжками пластическая обработка, например методом ХПТ, не только порождает продольную острую текстуру, не устранимую термообработкой и повышающую склонность к растрескиванию и к МКК, но и усложняет технологию многочисленными промежуточными отжигами. Все промежуточные термические обработки требуют тщательного обезжиривания внутренней поверхности труб, применения высокочистых защитных атмосфер и значительных энерго- и трудозатрат. Если не удастся применить эффективную газовую защиту труб при нагреве, то дополнительно появляется химическая обработка, которая затруднена на внутренней поверхности особенно длинномерных труб.

Настоящая работа является частью комплексных разработок и исследований на уровне проектирования технологического задания на создание и внедрение принципиально новой технологии и нестандартного оборудования для малотоннажного производства проволочной заготовки и труб из нестабилизированных аустенитных сталей для теплообменных аппаратов атомных реакторов. Поскольку данная работа касается лишь прокатного передела, выполняемого в совмещенном агрегате прессования–сортовой или редуccionной прокатки–регламентируемого охлаждения горячекатаных проволочных или трубных заготовок, общие схемы технологического процесса производства металлопроката при переработке металлургической окалины или железистых кварцитов представлены здесь контурно без значительной детализации общеметаллургического передела.

В случае организации производства труб и проволочной заготовки с переработкой металлургической окалины технологический процесс представляется следующим образом.

В качестве исходных сырьевых материалов используются:

- металлургическая окалина, как сухая, так и замасленная; последняя подвергается обжигу без доступа кислорода с образованием пиролизного газа; углерод, образующийся при обжиге, в дальнейшем устраняется, участвуя в реакции восстановления железа из оксидов;
- хромовая руда Уральского месторождения: Cr_2O_3 – 35...46 %; FeO – 12...20 %; SiO_2 – 5...10 %; MgO – 16...21 %; Al_2O_3 – 16...23 %;
- ферроалюминий (60 % Fe, 40 % Al), например, производства Нижне-Салдинского металлургического завода; выплавляется из Al марок А5...А6 и обсечных отходов метизного производства (Ст0 ГОСТ380-94);
- ферроникель для выплавки стали аустенитного класса;
- известь для корректировки шлака.

Технологическая схема производства труб из нестабилизированных коррозионно-стойких сталей аустенитного и ферритного классов приведена на рис. 1.10 [30].

Данная технология безотходна и позволяет получать в качестве товарной продукции:

- трубы для ТВЭЛов и теплообменников ядерных реакторов из коррозионно-стойких нестабилизированных сталей аустенитного и ферритного класса;
- проволочную заготовку для изготовления дистанционирующей проволоки;
- безуглеродистый феррохром;
- металлический магний или периклаз;
- клинкер глиноземистого цемента.

Важным достоинством данной технологии следует считать возможность получения безуглеродистого феррохрома, который используется не только для получения коррозионно-стойкой стали, но и является товарной продукцией.

Применяемый плавильный агрегат с герметизируемым рабочим пространством дает возможность утилизации содержащегося в хромовой руде магния. Последний восстанавливается алюминием при неглубоком вакуумировании плавильной емкости. Пары магния после отсоса из агрегата либо конденсируются без окисления, либо окисляются с получением периклаза для футеровки тиглей.

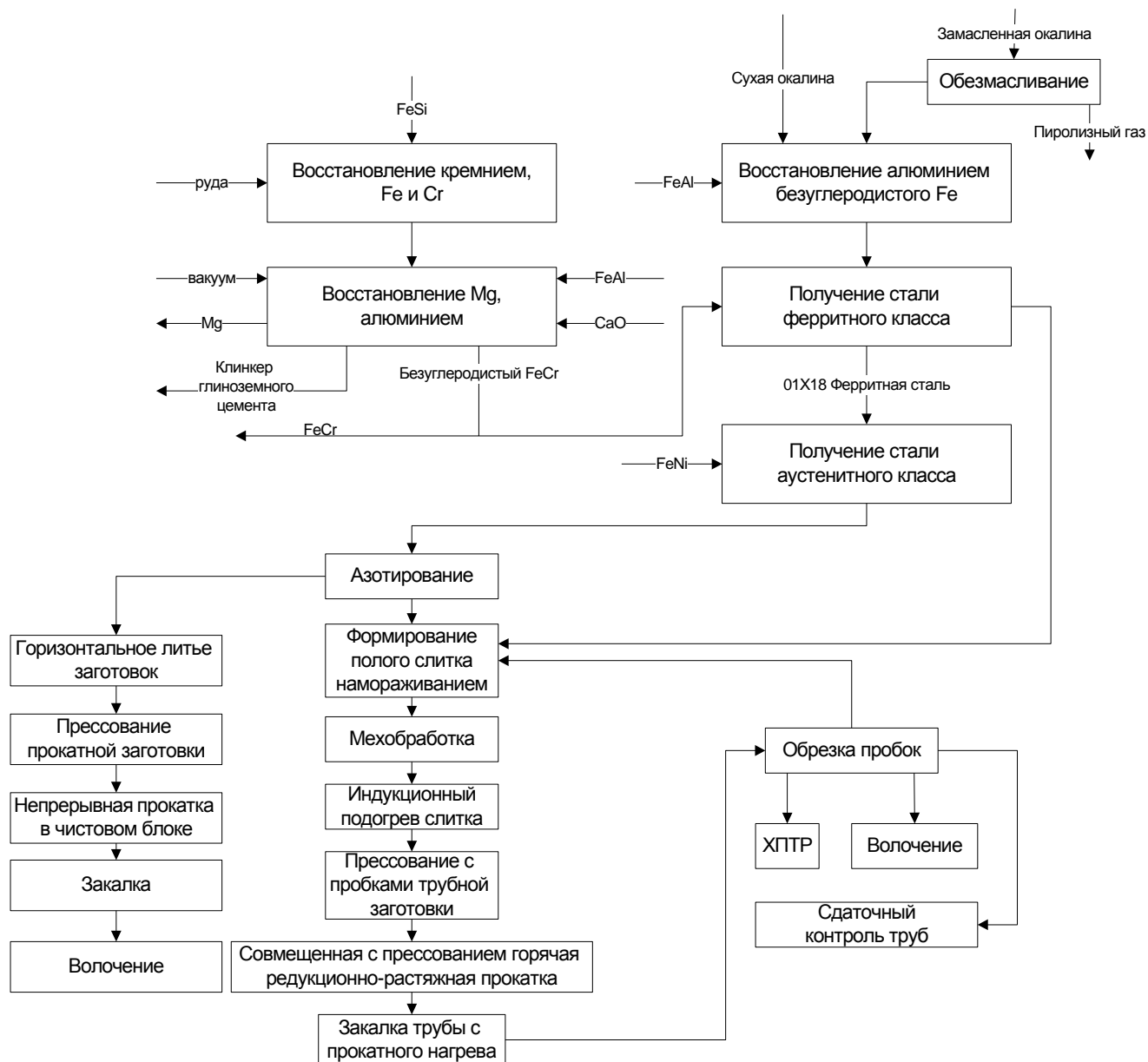


Рис. 1.10. Технологическая схема изготовления заготовок проволоки и труб с переработкой металлургической окалины

Аналогична описанной технология переработки железистых кварцитов, например, Михайловского месторождения: $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ –55,5 %; SiO_2 –42,5 %; Al_2O_3 –0,5 %; CaO –1,5 %. В качестве дополнительных компонентов плавки также используется хромовая руда, ферросилиций, ферроалюминий и CaO или CaF_2 .

Восстановление железа и хрома осуществляется кремнием, а кремния и магния алюминием. Образующийся в итоге ферросиликохром является оборотным и товарным продуктом. При получении безуглеродистой аустенитной стали её упрочнение достигается плазменным азотированием.

Технологическая схема переработки железистых кварцитов с получением нержавеющей обезуглероженных сталей как ферритного, так и аустенитного классов приведена на рис. 1.11.

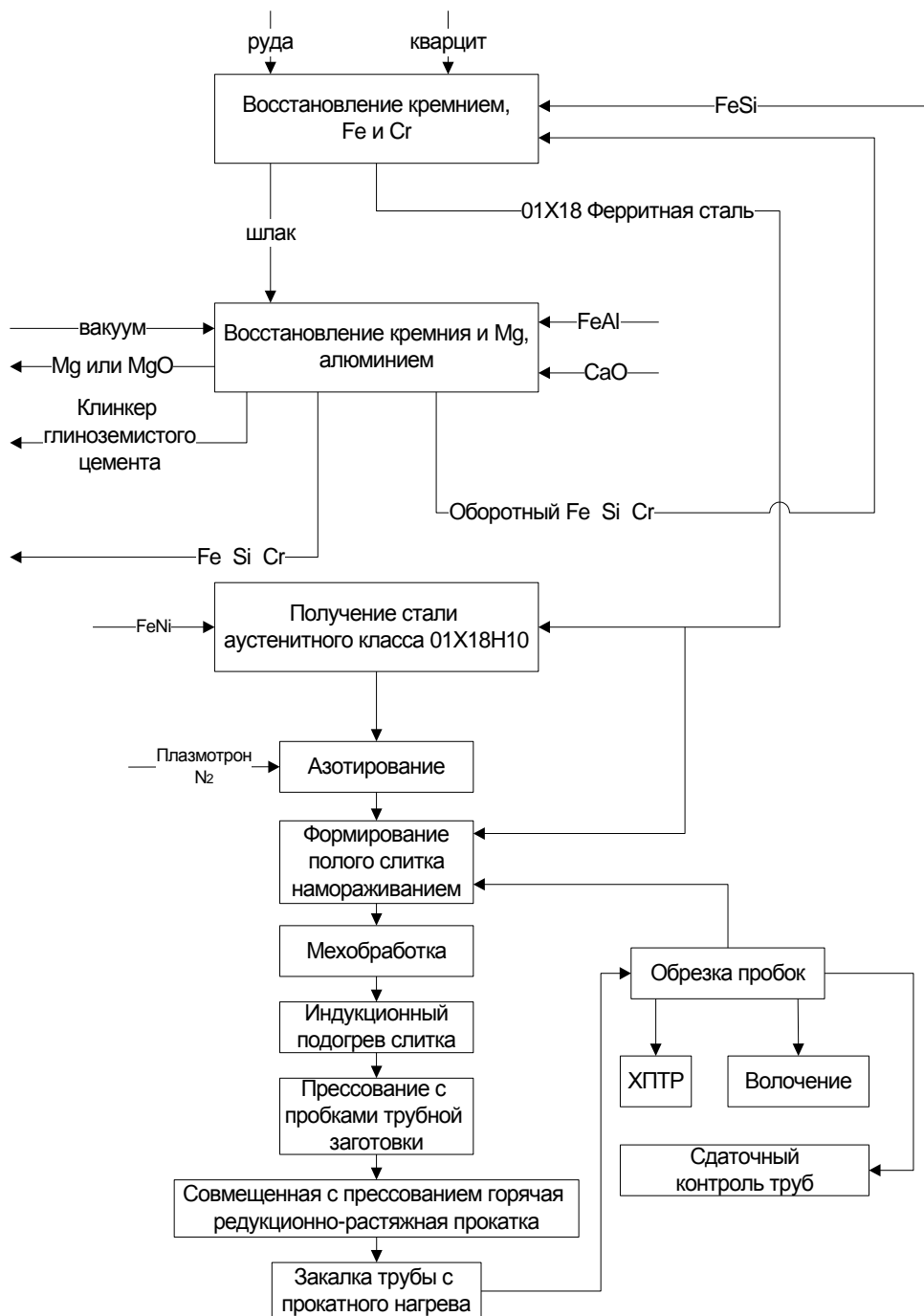


Рис. 1.11. Технологическая схема переработки железистых кварцитов и изготовления нержавеющей труб

Все плавильные операции при получении безуглеродистого железа и нержавеющей стали выполняются в плавильном агрегате оригинальной и запатентованной конструкции (RU 2207476, RU2184327), схематично показанном на рис. 1.12 [31, 32].

Промежуточный ковш агрегата, изображенного на рис. 1.12, выполнен в конструктивном исполнении, предназначенном для горизонтального литья сплошных заготовок для последующего горизонтального прессования из них прутков.

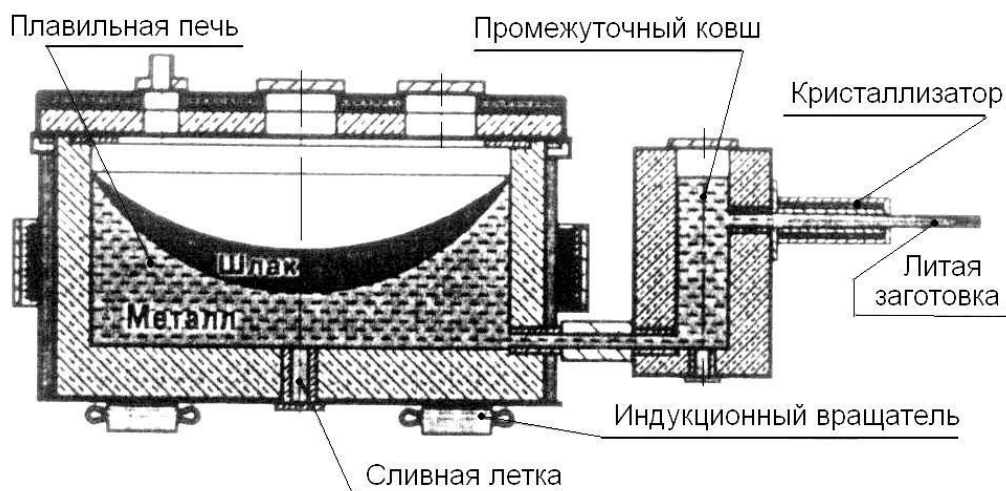


Рис.1.12. Индукционный плавильный агрегат, совмещенный с промежуточным ковшом

Агрегат строится на базе тигельной индукционной печи, на днище которой устанавливается низкочастотный индукционный вращатель, собранный из нескольких тангенциально установленных линейных электродвигателей. В боковой стенке тигля ниже индуктора формируется теплоизолированный металлопровод, соединяющий плавильную камеру с дополнительной емкостью, играющей в агрегате роль промежуточного ковша горизонтальной литейной машины. В боковой стенке промежуточного ковша выполняется металлопровод, к которому традиционным способом пристыковывается водоохлаждаемый кристаллизатор. В осях плавильной емкости и промежуточного ковша размещены сливные летки, а в центре крышки плавильной емкости – окно для установки эжекторной системы шлакоотсоса.

Скорость вращения расплава металла в плавильной емкости и высота подъема жидкого металла вдоль стенок тигля управляются частотой тока питания ин-

дукционного вращателя. Образующийся параболический мениск металла существенно увеличивает площадь контакта металла со шлаком и позволяет полностью изолировать футеровку стенок тигля от агрессивного воздействия шлака.

Температура расплава регулируется током индуктора, ее равномерное распределение в объеме плавки достигается активным перемешиванием при вращении.

Сифонная связь плавильной и дополнительной емкостей агрегата дает возможность устанавливать требуемый уровень зеркала расплава в промежуточном ковше горизонтальной МНЛЗ за счет регулирования частоты вращения жидкого металла в плавильной емкости. Решается одна из проблем горизонтального литья заготовок – изменение металлостатического давления на входе в кристаллизатор в процессе разливки. Кроме того, полностью исключается окисление металла, подводимого к кристаллизатору, поскольку связывающий емкости металлопровод расположен в донной части.

В случае использования описанного плавильно-литейного агрегата для получения полых прессовых заготовок промежуточный ковш оснащается устройством для литья методом намораживания на полый водоохлаждаемый кристаллизатор. Конструктивная схема промковша для литья полых слитков показана на рис. 1.13 [33].

Полученная в плавильной емкости сталь по металлопроводу передается в промежуточный ковш (литейную камеру) для формирования полого слитка намораживанием на полый водоохлаждаемый кристаллизатор. В качестве последнего используется готовая труба из стали той же марки, заглушённая снизу. Послойное намораживание проводится при циклическом движении подаваемого в литейную камеру расплава вдоль фронта кристаллизации. Управление движением жидкого металла осуществляется программным регулированием частоты тока питания МГД-устройств вращения расплава в плавильной емкости.

Такой способ, многократно опробованный при формировании полых литых заготовок из стали и алюминий-литиевых сплавов, гарантирует получение плот-

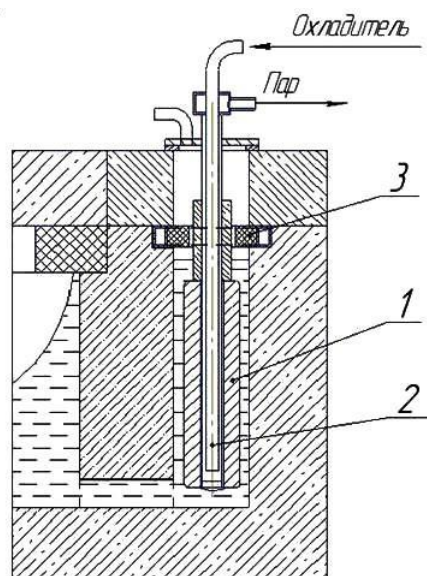


Рис. 1.13. Устройство для формирования полых слитков методом намораживания на полый водоохлаждаемый кристаллизатор: 1 – формирующаяся полая заготовка; 2 – трубчатый кристаллизатор; 3 – калибровочное графитовое кольцо

ной, однородной мелкозернистой структуры металла. Быстрая кристаллизация и обновление порций металла при его циклической подаче в литейную камеру устраняют ликвационную неоднородность. После достижения заданного наружного диаметра намораживаемой заготовки она извлекается вместе с кристаллизатором, который теперь становится частью полого слитка, определяя внутренний диаметр и гарантируя качество внутренней поверхности. Полая заготовка после отделения торцевых частей и горячей обточки наружной поверхности передается на подогрев и последующую горячую пластическую обработку. Поскольку внутренний канал слитка используется для зацентровки, после токарной обработки легко обеспечивается коаксиальность цилиндрических поверхностей заготовки.

В приведенных на рис. 1.10 и 1.11 технологических схемах в качестве пластической обработки предусматривается горячее прессование, совмещенное с сортовой или редуccionной прокаткой. Эффективность прессования определяется благоприятной схемой напряженного состояния и возможностью получения трубной заготовки с концевыми пробками, предотвращающими окисление внутренней поверхности. В горячем состоянии без удаления пробок труба, выходящая

из пресса, прокатывается до предготовых размеров в редукионном стане в клетях с четырехвалковыми калибрами.

Разработанные и изготовленные в опытно-промышленном и промышленном вариантах редукионные прокатные клетки снабжены индивидуальными гидроприводами валков. Четырехвалковые круглые (без эксцентриситета) калибры выполняются на конических бочках валков, что позволяет получать значительные вытяжки (до 1,25) без переполнения калибров, полностью предотвращать «гранёность» внутренней поверхности и формировать спиральную текстуру металла за счет скручивания трубы в каждом проходе. Система управления расходом рабочей жидкости в напорных линиях гидромоторов обеспечивает заданный режим межклетевых натяжений и натяжения трубной заготовки между прессом и станом. Закалка трубы выполняется замочкой или душированием на выходе редукионного стана. После закалки удаляются раскатанные пробки, и труба без термической и химической обработки передается на финишную холодную обработку прокаткой или волочением.

При производстве проволочной заготовки отливается горизонтальным способом сплошная заготовка. При этом шаг вытягивания принимается равным длине прессовой заготовки, а разделение слитка на мерные длины осуществляется по спаям шагов. После подогрева прессуется пруток круглого или квадратного сечения, который затем прокатывается в совмещенном прессово-прокатном агрегате, прокатный блок которого в данном случае оснащается четырехвалковыми сортопрокатными клетями. Прокатка проводится по схеме квадрат–круг или квадрат–квадрат. Сортопрокатные клетки от редукионных отличаются только калибрами. Возможна прокатка и по схеме круг–круг, но с меньшими единичными обжатиями.

Рассмотренные технологические варианты реализуются в комплексе нестандартного и несерийного оборудования (рис. 1.14; [34,35]):

– многофункциональный плавильный агрегат с системой гидродинамического вращения расплава и камерой для формирования полого слитка методом наморачивания на трубчатый водоохлаждаемый расходуемый кристаллизатор;

– горизонтальный высокоскоростной пресс с независимой двухпозиционной прошивной системой;

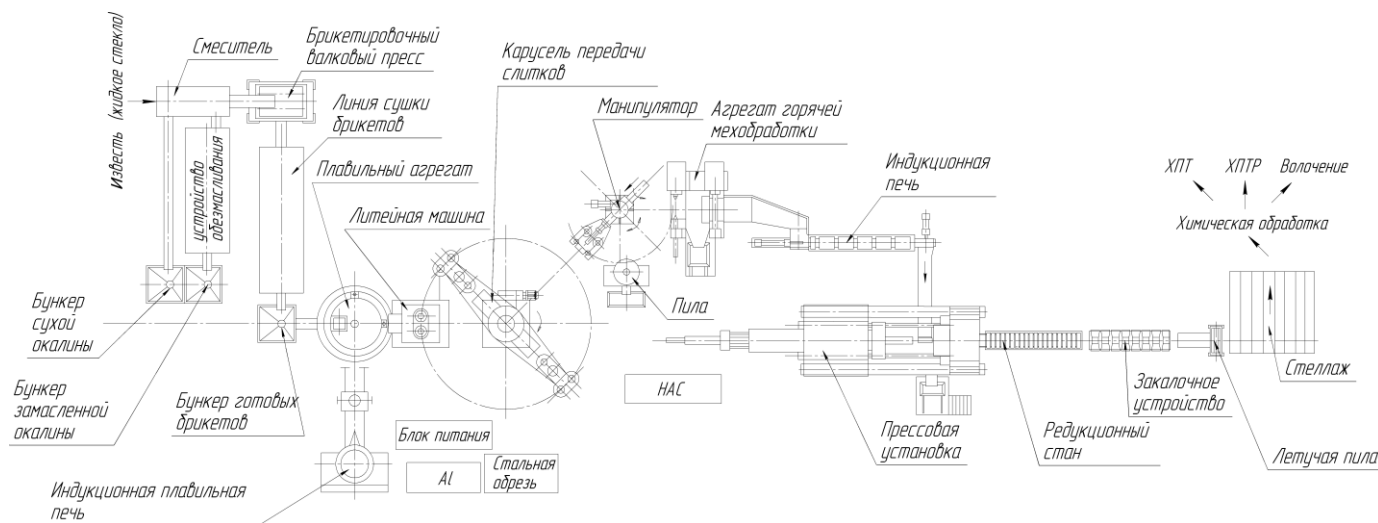


Рис. 1.14. Комплекс оборудования для производства теплообменных труб из коррозионно-стойкой стали с переработкой металлургической окалины

– редукционно-растяжной стан с четырехвалковыми гидроприводными клетями;

– вспомогательное оборудование (устройство подачи, оборудование горячей механической обработки слитков, индукционная проходная печь, линия заковки труб, пилы обрезки пробок, приемные карманы;

– оборудование обезмасливания окалины.

Достоинства новых технологий сводятся к следующему:

– экзотермическая реакция окисления алюминия (8 кВт-ч/кг) при жидкофазном восстановлении железа и хрома из окалины и руды;

– восстановление железа и хрома из оксидных материалов с низким содержанием углерода (<0,02 %) с получением нестабилизированной стали ферритного и аустенитного классов;

– интенсивное перемешивание расплава с обеспечением однородного химического состава и температурного поля;

– защита футеровки плавильной емкости от контакта со шлаком;

– возможность получения клинкера глиноземистого цемента и периклаза;

– возможность отливки полых плотных заготовок с мелкозернистой гомогенной структурой и чистой внутренней поверхностью;

– исключение операции прессовой или косовалковой прошивки и сверления труб-

ных заготовок;

- возможность прямого совмещения технологических операций;
- полное исключение промежуточных термической и химической обработок;
- возможность формировать винтовую текстуру или обеспечивать изотропию свойств металла трубных заготовок;
- энергосбережение за счет экзотермических реакций при восстановлении и за счет совмещения плавки, литья и горячей деформации;
- снижение трудозатрат и возможный высокий уровень автоматизации;
- безотходность технологии наиболее эффективной утилизации металлургической окалины, а также переработки техногенных отходов и забалансовых руд.

Принципиально новая технология и разработка оригинальных конструкций оборудования, часть элементов которого является мехатронными системами, без сомнения сопряжены с определенным производственным риском, оправданность которого обусловлена перспективами создания высококачественной продукции и кардинальным изменением структуры металлургического производства, гарантирующим максимальное энерго- и ресурсосбережение и создание сплавов с особыми физическими и механическими свойствами. Следует отметить, что даже приблизительные технико-экономические расчеты на объем производства труб из нестабилизированной нержавеющей стали до 40 тыс.т в год, например, при дислокации участка на промплощадке действующего трубного цеха, показывают беспрецедентно малый срок окупаемости капитальных вложений, не превышающий 0,5 года, несмотря на сравнительно трудоемкую и дорогостоящую пусконаладку принципиально нового оборудования и оптимизацию технологических параметров.

При изготовлении проволочной заготовки и труб из нержавеющей стали на описанном мини-металлургическом комплексе модульной структуры принципиально важной для обеспечения рентабельности малотоннажного производства является технология, оборудование и системы управления сортовой и редуцированной прокатки, напрямую совмещенной с прессованием и термической обработкой.

1.3. Обзор промышленно используемых технологий производства прутков и профилей прокаткой в многовалковых калибрах

Прокатка в многовалковых калибрах показала свою эффективность не только при изготовлении простых, но и фасонных профилей [36]. В первую очередь, сравнительно легко достигается высокая жесткость клетей и, следовательно, высокая размерная точность прокатки. В любом конструктивном исполнении количество опор валков в этих клетях больше, чем у двухвалковых клетей. В большинстве случаев многовалковый калибр размещается в цельной замкнутой станине, что снижает упругие деформации под действием разнонаправленных сил. Кроме того, в этих калибрах изменяется кинематика течения металла, существенно уменьшается уширение, и даже возможна прокатка с утяжкой профиля. В последнем случае диаметр заготовки может быть больше наибольшего размера сечения получаемого профиля. В частности, при прокатке по схеме круг–квадрат, диаметр сечения заготовки может быть больше длины диагонали квадратного калибра. В итоге, возможно достижение больших вытяжек, чем при двухвалковой прокатке. Авторы [36] вытяжную способность многовалковых калибров, а также систем калибров осуществляют коэффициентом эффективности деформации

$$K_{\text{эф}} = \frac{\lambda - 1}{\lambda_0 - 1},$$

где λ – реальная вытяжка при прокатке в многовалковом калибре;

λ_0 – вытяжка без учета уширения или утяжки профиля.

Суть коэффициента эффективности деформации в калибрах по И.М.Павлову сводится к выражению

$$K_{\text{эф}} = \frac{V_{\lambda}}{V_n} = 1 - \lambda \frac{S_b}{S_n},$$

где V_{λ} – объем металла, смещенный валками в продольном направлении; V_n – общий объем металла, смещенный валками; S_b – площадь сечения полосы, смещенная в поперечном направлении; S_n – общая площадь сечения полосы, смещенная валками.

Если $K_{\text{эф}} > 1$, то при многовалковой сортовой прокатке наблюдается утяжка профиля и возможно повышение вытяжек в соответствующем калибре. При $K_{\text{эф}} < 1$ уширение, даже при сравнительно невысоких вытяжках, создает переполнение калибра и вытекание металла в зазоры между валками с образованием заусенцев. При $K_{\text{эф}} = 1$ диаметры окружностей, описанных вокруг сечений заготовки и полосы, совпадают. По данным [36], $K_{\text{эф}}$ растет при прочих равных условиях с увеличением количества валков, образующих калибр.

В работе [36] приводится классификация сортовых станов с многовалковыми калибрами. Сортовые, мелкосортные и проволочные станы с многовалковыми калибрами классифицируют следующим образом:

- 1) станы с трехвалковыми калибрами;
- 2) станы с четырехвалковыми калибрами;
- 3) станы с многовалковыми калибрами, имеющие сменные кассеты с трехвалковыми и четырехвалковыми калибрами.

Впервые клетки с трехвалковыми калибрами были построены в 50-х годах итальянским изобретателем Проперци [37]. Способ прокатки и конструкции непрерывных станов с трехвалковыми калибрами постоянно совершенствуют [38]. В работе [38] описано состояние развития конструкций клеток с трехвалковыми калибрами с ссылками на патенты US2789450, US3142208 и US3552164. Также непрерывные станы, имеющие трехвалковые калибры, конструкции «ВНИИмет-маша» описаны в работах А.И.Целикова [38].

Первый промышленный чистовой блок клеток с трехвалковыми калибрами конструкции фирмы «Kocks», предназначенный для получения стальной катанки, был пущен в эксплуатацию в 1957 г. [39]. Конструкция непрерывного стана для этого блока была запатентована Ф. Коксом еще в 1940 г. (пат. US2214279). Затем конструкции проволочных и мелкосортных непрерывных станов с трехвалковыми калибрами, выпускаемыми фирмой «Kocks», непрерывно совершенствовались.

На рисунке 1.15 представлена чистовая рабочая клеть с одним вводным валом. Эта клеть имеет механизм радиальной регулировки валков в виде эксцентри-

ковых втулок, шарнирно соединенных с приводом их поворота.

Существенный недостаток описанных прокатных клетей с трехвалковыми калибрами – низкая нагрузочная способность по усилию прокатки и по подводимому к валкам крутящему моменту. Это снижает величину деформации полосы в

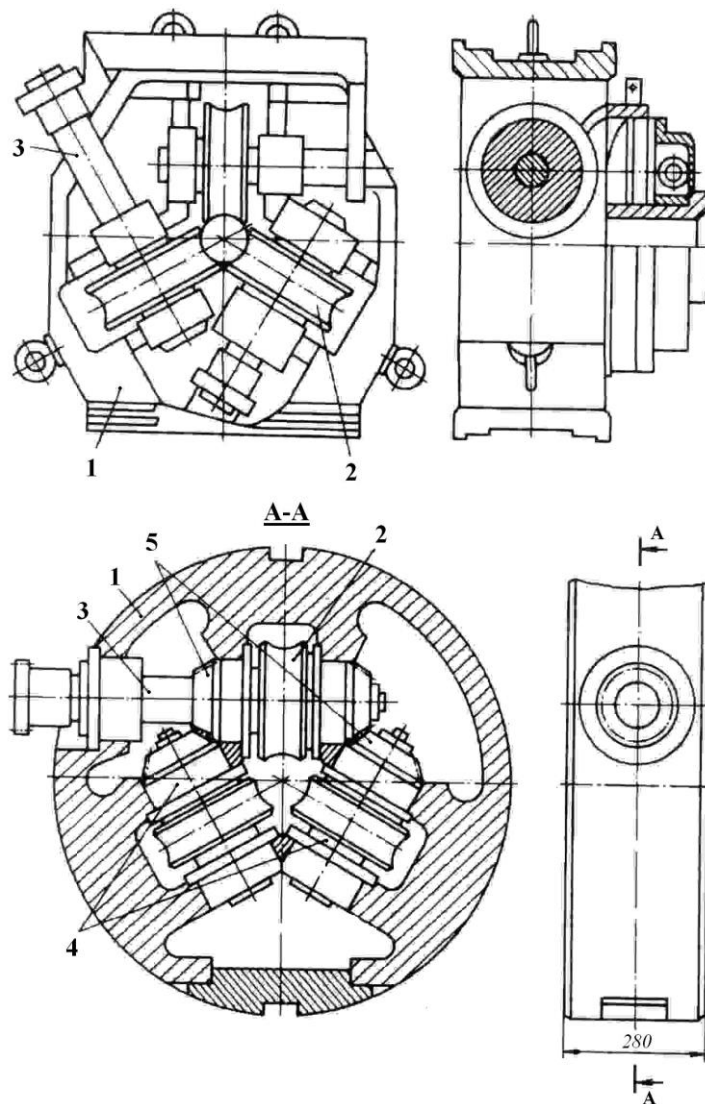


Рис. 1.15. Трехвалковая клетя с одним вводом по US2214279:
1 – станина; 2 – валки; 3 – приводной шпиндель; 4 – ось валка;
5 – опоры подшипников

каждой клетки и ограничивает возможность прокатки материалов с высоким сопротивлением деформации. Для устранения этого недостатка фирма «Kocks» создала конструкции клетей и блоков с индивидуальным приводом каждого валка [39].

В практике производства достаточное распространение получила конструкция клетки с тремя вводными валами фирмы «Kocks» (рис. 1.16). В такой кон-

струкции конические зацепления, хотя и существенно удалены от рабочих валков, но смонтированы в корпусе клетки и являются его неотъемлемой частью. Несущая способность клетки повышается в результате усложнения самой клетки и введения отдельно стоящей шестеренной клетки с семью шестернями, расположенными в вертикальной плоскости.

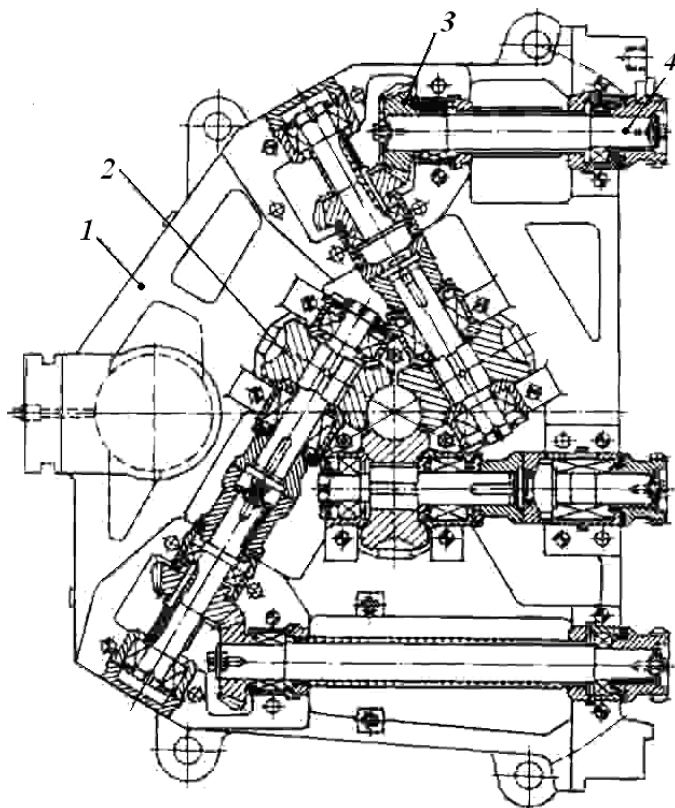


Рис. 1.16. Трехвалковая рабочая клетка конструкция фирмы «Kocks» [39]:
1 – рабочая клетка; 2 – рабочий валок; 3 – коническое зацепление; 4 – вводной вал

Трехвалковые клетки с тремя вводами могут быть различной конструкции, но во всех случаях условия работы конических зацеплений значительно улучшены, так как эти передачи отнесены от зоны валков; подшипниковые узлы всех трех валков находятся в равных условиях, испытывая только радиальные нагрузки, а осевые сведены до нуля.

Подобные конструкции клеток предложены Проперци (Италия) [40], компанией «Sumitomo Heavy Industries Ltd» (Япония) [41]. Валки клеток имеют осевую и радиальную регулировку в ограниченных диапазонах (3...6 мм), которые зависят от диаметров валков. Последние конструкции трехвалковых клеток компании

«Kocks» [42, 43] позволяют осуществлять перевалку валков без демонтажа шпинделей привода клетей.

Станы для горячей прокатки с четырехвалковыми калибрами впервые созданы в «ЧПИ» [44]. Например, одноклетевой блок с номинальным диаметром валков 300 мм [45] используют для горячей прокатки круглой стали диаметром 12...26 мм. Горизонтальная и вертикальная пары валков в блоке смещены на расстояние 145 мм. Приводной выполнена только первая по ходу прокатки горизонтальная пара валков. Горячее калибрование осуществляется путем поочередного обжатия круглого проката обычной точности горизонтальной и вертикальной парами валков. Валки блока имеют механизмы радиальной и осевой регулировки. Разработаны также и другие конструкции прокатных клетей с четырехвалковым калибром [45–47], предназначенных для горячей калибровки квадратного и полового проката.

Из существующих в современной практике прокатных многовалковых сортовых клетей самыми эффективными признаются четырехвалковые, где даже при сравнительно малых вытяжках $K_{эф}$ может превышать единицу. Трехвалковые клетки, применяемые при прокатке по схеме круг–треугольник–круг, занимают по эффективности промежуточное положение между двух- и четырехвалковыми клетями. Клетки с числом валков больше четырех не нашли промышленного применения из-за сложности конструктивного исполнения, малой надежности и трудности настройки при получении точных профилей.

Основным конструктивным недостатком клетей с многовалковыми калибрами следует считать применение длинных трансмиссионных цепей привода. Один двигатель посредством главного редуктора передает прямое вращение лишь на один валок клетки. Остальные приводятся за счет трансмиссионных валов и дополнительных конических редукторов. Также известно, что традиционная схема привода любого прокатного стана включает в себя главный редуктор, обеспечивающий необходимое передаточное число между электродвигателем и рабочей клетью, и шестеренную клеть, предназначенную для распределения передаваемого момента между валками рабочей клетки [48–50]. Для соединения шестеренной и

рабочей клетей используются универсальные или зубчатые шпиндели [51]. Достаточно полный обзор существующих вариантов приводов сортопрокатных станов и пути совершенствования описаны автором работы [52]. Низкая стойкость конических зубчатых передач и быстрое появление люфтов в линии привода ухудшают эксплуатационные характеристики клетей. Люфты создают асимметрию очагов деформации в моменты входа полос. Результатом является отгиб выходящих передних концов полос, дополнительные нагрузки на проводковые устройства, необходимость резки достаточно длинных передних концов летучими ножницами. Варианты исполнения клетей с частично приводными валками не спасают положения, поскольку холостые валки также порождают асимметрию процесса прокатки.

Отличительной особенностью конструкций многовалковых клетей является способ сборки многовалковых калибров. Существующие способы сборки трехвалковых [39, 53–55], четырехвалковых [56, 57] и многовалковых [58] калибров, предназначенных для вытяжной прокатки, довольно полно освещены в литературе.

Наиболее простой способ сборки трехвалковых калибров, широко используемых для горячей вытяжной и чистовой прокатки черных и цветных металлов – сборка с зазором между соседними валками (рис. 1.17, *a*). Такая сборка упрощает

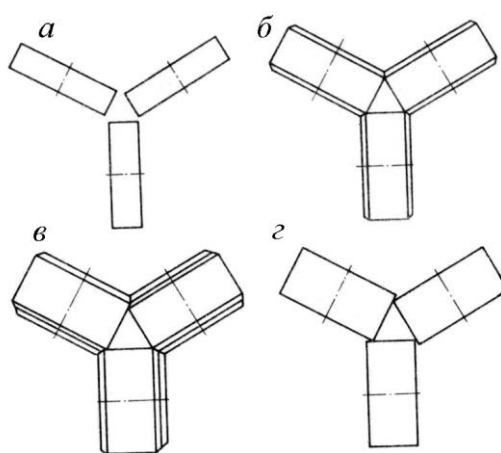


Рис. 1.17. Способы сборки трехвалковых калибров

конструкцию прокатных валков, снижает трудоемкость их изготовления, облегчает многократное восстановление и повышает стойкость [36]. Этот способ сборки

широко используют на мелкосортных и проволочных станах конструкции фирмы «Kocks» [39].

Сборку с зазором между соседними валками используют и на станах с четырехвалковыми калибрами (рис. 1.18, *а*), например, на проволочном стане конструкции «МГМИ–SKET» [36].

Однако способ сборки валков в многовалковый калибр с зазором между соседними валками имеет и существенные недостатки. При использовании калибров, собранных таким способом, на клетях без механизмов осевой и радиальной регулировки требуются специальные станки для одновременной обработки всех валков, смонтированных в прокатной клети. При использовании таких калибров на клетях с механизмами радиальной и осевой регулировки для настройки положения валков требуется специальный механизм или, по крайней мере, специальный шаблон.

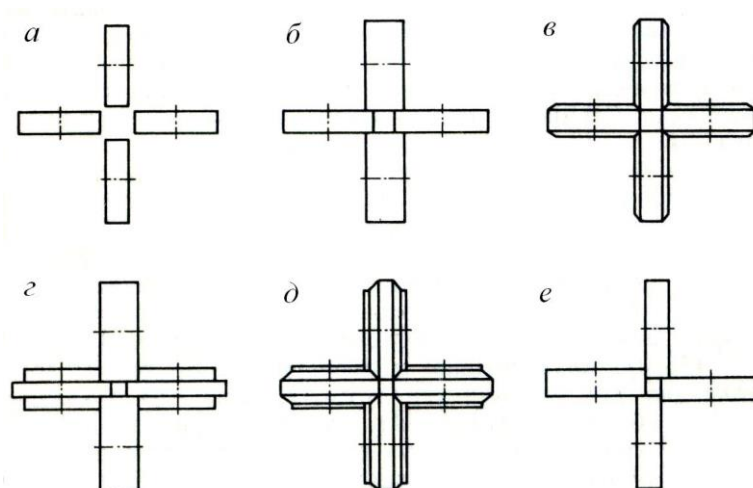


Рис. 1.18. Способы сборки четырехвалковых калибров

Во избежание указанных недостатков вместо рассмотренных способов сборки многовалковых калибров с зазором между соседними валками разработаны способы сборки калибров с контактом между соседними валками на специальных замковых участках бочек прокатных валков (рис. 1.17, *б*, *в*; рис. 1.18, *б-д*). Сборка с контактом между соседними валками частично или полностью ограничивает перемещение валков относительно друг друга в радиальном и осевом направлениях. Способы сборки многовалковых калибров с контактом между со-

седними валками на специальных замковых участках бочек исключают дополнительную настройку калибра. Такую сборку калибров успешно используют при прокатке фасонных профилей высокой точности.

Однако сборка с контактом между соседними валками имеет существенные недостатки: усложняется конструкция прокатных валков, повышается трудоемкость их изготовления и последующего восстановления, увеличивается расход материала. Стойкость валков часто понижается из-за быстрого износа замковых участков бочек. Трение на замковых участках бочек валков значительно повышает расход энергии, подводимой к рабочим валкам. Такой способ сборки не позволяет менять размеры калибра, а валки образуют только один калибр [36].

Для устранения последнего недостатка разработаны способы сборки многовалковых калибров и конструкции валков, собранных с перекрытием бочек (рис. 1.17, *г* и рис. 1.18, *е*), позволяющие размещать на бочке каждого валка два [56, 59] или три ручья. На рис. 1.19 показаны способы сборки трехвалковых калибров при размещении на бочке каждого валка двух ручьев.

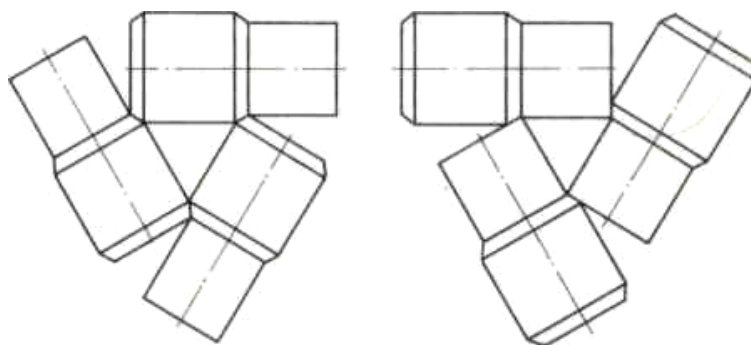


Рис. 1.19. Сборка трехвалковых калибров с размещением двух ручьев на бочке каждого валка

При сборке первого калибра, образованного цилиндрическими ручьями большего диаметра, контакт между соседними валками осуществляется по коническим замковым участкам. При сборке второго калибра, образованного цилиндрическими ручьями меньшего диаметра, контакт между соседними валками осуществляется по коническим замковым участкам и торцам бочек валков. На рис. 1.20 показаны способы сборки двух четырехвалковых калибров, один из которых образован цилиндрическими ручьями, а другой – фасонными [56].

Размещение двух ручьев на валках, образующих многовалковые калибры, позволяет расширить сортамент проката, в 2 раза увеличить срок службы валков, уменьшить потери времени на перевалки, снизить расход инструментальной стали и вдвое уменьшить парк рабочих валков. В этом случае сборка и регулирование размеров многовалкового калибра осуществляется путем радиального и осевого смещения каждого из валков.

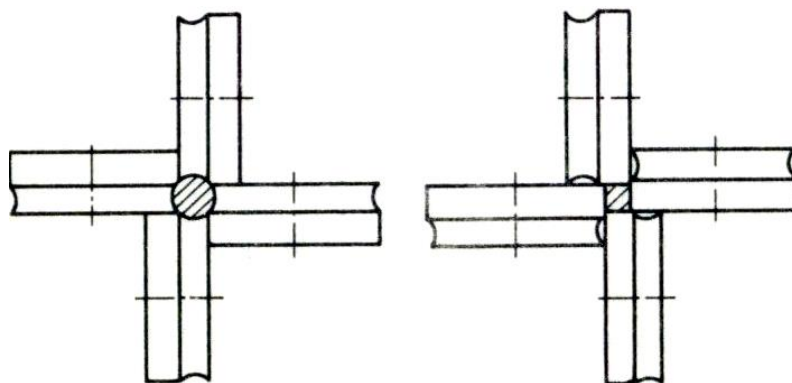


Рис. 1.20. Сборка четырехвалковых калибров с размещением двух ручьев на бочке каждого валка

Применение калибров, выполненных на конических бочках и образованных гладкими коническими бочками, известно сравнительно давно. Например, двухвалковый круглый калибр, образованный ручьями на конических валках, описан в а.с. СССР №1202645 [60]. Калибр применен с целью повышения точности размеров и качества поверхности круглого профиля. Предложенное конструктивное исполнение валкового узла показано на рис. 1.21.

По мнению авторов изобретения, повышение точности и качества поверхности проката обусловлено тем, что каждое элементарное сечение круглого профиля при прокатке совершает вращательно-поступательное движение вдоль очага деформации. При этом каждая точка поверхности круглого профиля подвергается многократной деформации, то есть те части контура элементарного сечения, которые в момент захвата попадают в разъем калибра, совершая вращательно-поступательное движение вдоль очага деформации, смещаются относительно разъема и подвергаются деформации в круглом калибре. Многократная деформация точек поверхности профиля повышает эффективность выкатывания микродефектов.

Известны также [61] многовалковые калибры, образованные гладкими коническими бочками валков, применяемые с целью оперативного изменения размеров калибра и расширения, за счет этого, технологических возможностей оборудования. Два варианта конструктивного исполнения трехвалковых узлов с коническими валками показаны на рис. 1.22.

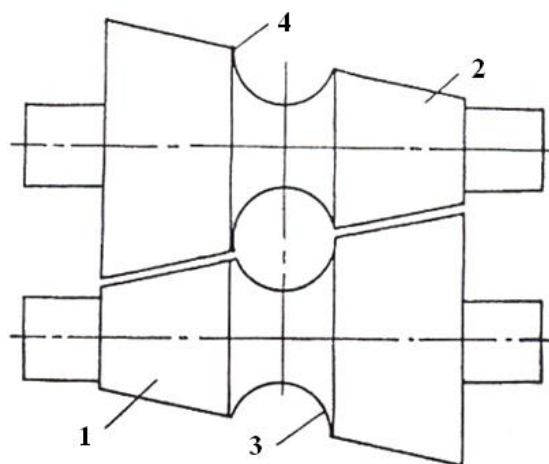


Рис. 1.21. Двухвалковый калибр [60]

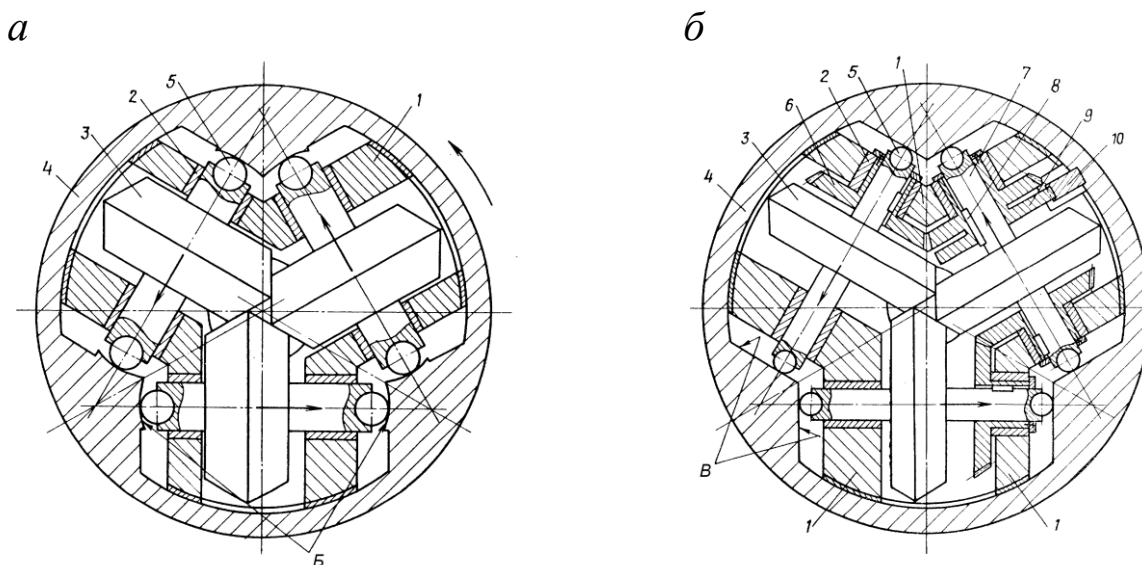


Рис. 1.22. Трехвалковые калибры [61] (описание позиций по тексту)

Валковый узел, изображенный на рис. 1.22, *а*, содержит станину 1 с неподвижными валковыми опорами 2, расположенные вокруг оси прокатки валки 3 и общий для всех валков кулачок 4, имеющий по паре направляющих опорных поверхностей Б для каждого валка. При настройке калибра клетки кулачок 4 поворачивают относительно неподвижной станины 1. При этом направляющие опорной

поверхности Б кулачка 4, воздействуя на осевые опоры валков 5, синхронно смещают валки относительно станины 1 вдоль осей их вращения. Таким образом, осуществляется сведение или разведение валков и настройка узла на заданный размер трехвалкового калибра. В таком варианте конструктивного исполнения клеть пригодна лишь для редуцирования или волочения, поскольку привод валков невозможно осуществить. Однако изобретение показывает эффективность подобной схемы сопряжения валков с точки зрения существенного изменения размеров калибра без раскрытия зазоров на поверхностях сопряжения валков.

В другой конструкции валкового узла (рис. 1.22 б) вращение валков 3 синхронизировано коническими шестернями 6, установленными на валках 7 с возможностью их осевого перемещения. На оси одного из валков установлена шестерня 9, находящаяся в постоянном зацеплении с зубчатой рейкой 10, которая и осуществляет привод валков при ее перемещении в направлении параллельном оси прокатки. Регулировка калибра в этом валковом узле выполняется, как и в предыдущем калибре. Области применения такой клетки весьма ограничены из-за конечной и сравнительно небольшой длины рейки. Валковые узлы, изображенные на рис. 1.18, не готовы к промышленному применению еще и по причине невозможности переточек валков при их износе. В случае переточки диаметры валков уменьшаются и при сборке узла образуются зазоры, которые нельзя устранить осевым перемещением валков. Зазоры снижают вытяжную способность системы калибров и, следовательно, коэффициент эффективности деформации.

С целью повышения жесткости многовалковых клетей и точности прокатки используют двухопорную установку валков, что усложняет конструкцию линии привода и затрудняет перевалку клетей. Консольная же установка валков не дает большого эффекта в повышении жесткости в сравнении с двухвалковыми клетями. Правда, конструкции клетей с консольными (грибовидными) валками значительно проще и удобней. В этом плане им следует отдать предпочтение и повышать жесткость клетей за счет иных конструктивных особенностей, не усложняющих эксплуатацию.

Если бочки валков цилиндрические, то при любом конструктивном исполнении клетки регулировка калибра достигается с неминуемым снижением жесткости и усложнением эксплуатации. Это следует из рассмотрения возможных вариантов сопряжения четырех валков, показанных на рис. 1.18.

В схеме замыкания калибра, показанной на рис. 1.18 *a*, регулирование размеров квадратного калибра возможно лишь параллельным смещением осей валков. Конструктивно это достигается трудно и всегда с понижением жесткости клетки. Более приемлемый вариант установки валков в данном случае – это размещение в подушках эксцентриковых поворотных втулок, синхронный разворот которых возможен с применением достаточно громоздких механизмов. Даже при удачном конструктивном решении проблемы параллельного смещения осей валков необходимо ввести шарниры в шпиндели привода, которые обязательно даже после незначительного износа создадут люфты и асимметрию прокатки в период захвата полосы. При регулировании этим способом размера калибра следует помнить об изменении торцевых зазоров, раскрытие которых более определенной величины приведет к снижению единичных обжатий из-за опасности формирования продольных заусенцев на полосе.

Проблема заусенцев и обжатий удачно решается в схеме рис. 1.18 *e*, где калибр при любых размерах остается закрытым, а торцевые зазоры минимальны и определяются только жесткостью клетки и точностью изготовления валкового узла. В то же время трудно представить конструктивное исполнение клетки, конкурирующее в простоте с предыдущей схемой. Кроме поперечного смещения валков возникает необходимость еще и в осевой поднастройке калибра. Возможно, данное обстоятельство ограничивает широкое промышленное использование этой достаточно эффективной схемы формирования регулируемых четырехвалковых калибров.

Важным достоинством клетей с многовалковыми калибрами является постоянство кантовок при чередовании клетей в группах или блоках. Современные блоки и группы двухвалковых клетей для производства простых сортовых профилей строятся по принципу чередования клетей с кантовками под 90^0 . Это унифи-

цирует конструкции оборудования, но не позволяет использовать весь возможный набор систем калибров. По вытяжной способности очень эффективными являются системы квадрат–шестиугольник–квадрат (в черновых группах) и квадрат–овал–квадрат (в предчистовых и чистовых группах). Однако без применения кантующих (скручивающих) проводковых устройств, или без режима последовательной прокатки с полным выводом полос из клетей, или без линейной схемы прокатки, использование этих систем становится невозможным из-за необходимости кантовки под 45^0 . Что касается, например, четырехвалковых клетей, то, установив в блоке или в группе клетки с взаимным разворотом под 45^0 , можно реализовать обе схемы обжаты: квадрат–квадрат и круг–квадрат–круг, которые по вытяжной способности не уступают самым эффективным системам двухвалковых калибров.

Схемы расположения прокатных клетей и дополнительного оборудования довольно подробно описаны С.М. Жучковым и А.А. Горбанёвым [62–65]. Авторы рассматривают историю развития и современное состояние технологии и оборудования сортопрокатных линий с использованием клетей блочной конструкции с многовалковыми калибрами. Развитие сортовых и мелкосортных станов осуществлялось с учетом требований компактности, малых расстояний между клетями, отсутствия петлеобразования и кантовки, а также одноконтурной прокатки. В результате были созданы чистовые группы клетей проволочных станов блочной конструкции [62].

В работе [36] построена кинематическая модель очага деформации, которая с точностью до неизвестных параметров, таких как вытяжка и критический угол, позволяет определить относительное скольжение, критические линии, опережение, катающий диаметр и построить поле скоростей в общем случае прокатки сортовых профилей в многовалковых калибрах. При прокатке без уширения кинематическая модель определена с точностью до критического угла. Также модель позволяет определить усилие прокатки, мощность внутренних сил, поверхностных сил, подводимую валками мощность, мощность трения скольжения, продольных сил, инерционных сил и коэффициент полезного действия процесса прокатки. При этом неизвестные параметры (вытяжка и некоторый положительный

коэффициент) определены из решения вариационного уравнения принципа минимума полной мощности, а критический угол – из решения уравнения, описывающего закон сохранения энергии (баланс мощностей) в интегральной форме. Удельное усилие прокатки определено из решения уравнения, описывающего закон сохранения энергии в дифференциальной форме.

Постоянные требования к увеличению скорости прокатки, повышению требований к свойствам и структуре прокатываемых профилей обусловили существенное изменение и в технологии охлаждения. Было разработано более двадцати способов контролируемого охлаждения профилей в линии мелкосортных и проволочных станов («Стилмор», «Шлеман», «Демаг», «ЕД и ЕДС», «Явата» и др.) [66–72]. Наибольшее распространение получили линии «Стилмор» благодаря простоте конструкции, широкой возможности воздействия на структуру и свойства горячего проката различных марок стали, от низкоуглеродистых до высоколегированных. Линии охлаждения состоят из двух участков: многоступенчатого водовоздушного охлаждения и охлаждения вентилируемым воздухом на рольганге. В литературе [73, 74] описаны физические и математические модели, позволяющие произвести расчет установок, обеспечивающих соблюдение необходимого закона изменения температуры в линии охлаждения. Модели созданы на основании решения дифференциального уравнения теплопроводности численными методами с применением граничных условий. К недостаткам таких моделей можно отнести невозможность управления скоростью охлаждения по обратной связи с оборудованием линии охлаждения.

При осуществлении контролируемого охлаждения учитываются высокие требования к температуре полосы в непрерывном прокатном стане, в частности температуре конца прокатки. Характер изменения абсолютных значений температуры металла по длине непрерывного сортового прокатного стана во многом определяет уровень энергозатрат на прокатку. Высокие скорости прокатки и компактное расположение рабочих клеток обусловили специфический характер изменения температуры прокатываемой полосы (раската) по длине современных непрерывных среднесортных, мелкосортных и мелкосортно-проволочных ста-

нов [76]. Сначала в обжимных, черновых и промежуточных группах рабочих при сравнительно низких скоростях прокатки происходит существенное снижение температуры прокатываемого металла (от 1100...1200 до 900...950 °С), что приводит к соответствующему росту энергосиловых параметров деформации. Затем, когда на первый план выступает задача формирования профиля и структуры готового проката, температура прокатываемого металла начинает расти за счет деформационного разогрева и достигает 1000...1050 °С. В этой связи особое значение имеют характер изменения и абсолютные значения температуры металла по маршруту прокатки при производстве готового проката с жестко регламентированными показателями по уровню механических и технологических свойств, особенно при производстве проката из высоколегированных марок стали специального назначения [76].

В настоящее время существует два подхода к математическому моделированию физических процессов [77] и, в частности, к математическому моделированию температурного режима прокатки аналитический и идентификационный.

Первый основан на аналитических зависимостях процесса теплопередачи и предусматривает составление уравнения суммарного теплового баланса системы «прокатываемый раскат – прокатный стан». Другой подход базируется на использовании эмпирических уравнений, как правило, уравнений регрессии, полученных на основании статистического анализа результатов экспериментальных исследований температурного режима прокатки на данном конкретном стане [78].

При выборе метода формирования модели руководствуются степенью изученности исследуемого объекта, в нашем случае – температурного режима прокатки на непрерывном сортовом стане. В том случае, если исследуемый процесс достаточно полно аналитически изучен или имеет теоретическое истолкование, целесообразно разрабатывать математическую модель на аналитической основе, что обеспечивает в результате более строгое решение поставленных задач. Идентификационные модели используются в случае слабой изученности объектов моделирования и отсутствия соответствующих теоретических разработок.

Каждому из этих подходов присущи достоинства и недостатки. К достоинствам аналитического подхода следует отнести более строгое описание теплофизических процессов, имеющих место при горячей прокатке, и универсальность полученного средства аналитического исследования температурного режима прокатки (теплофизической математической модели непрерывной сортовой прокатки), которое может применяться для прогнозирования температурного режима прокатки любого сортового стана, в том числе и вновь строящегося. Идентификационные статистические теплофизические математические модели описывают температурные условия конкретного стана и могут использоваться только на этих или однотипных станах, например при освоении новых видов продукции, совершенствовании режима нагрева и прокатки металла. Это ограничивает область применения идентификационных математических моделей.

В этой связи выбор метода формирования теплофизической математической модели непрерывной сортовой прокатки следует осуществлять исходя из задач исследований. Необходимо отметить, что корректное описание уравнения суммарного теплового баланса раската в непрерывном прокатном стане затруднено, так как в настоящее время не существует достаточно строгих аналитических зависимостей, описывающих составляющие этого уравнения и их взаимное влияние друг на друга [78].

В настоящее время реализовано множество моделей [73–76, 78, 79], позволяющих рассчитать и реализовать на стане возможный температурный режим прокатки. Данные модели дают хорошую точность прогнозирования температуры; максимальная разность расчетных и экспериментальных данных не превышает 5 % [76]. Как правило, формирование теплофизической математической модели непрерывной сортовой прокатки, построенной на аналитической основе, сводится к составлению уравнения суммарного теплового баланса системы «раскат – непрерывный прокатный стан» [76, 80]. В процессе деформации нагретого под прокатку металла в клетях непрерывного сортового стана имеют место потери тепла, вызванные контактным теплообменом между элементами основного и вспомогательного технологического оборудования стана: рабочим инструментом про-

катных клетей, ножниц, рольгангов, рабочими поверхностями привалковой арматуры, передаточных столов и другими элементами, а также естественным остыванием нагретого металла в окружающей среде за счет излучения и конвективного теплообмена с воздухом и водой, охлаждающей как рабочие поверхности основного и вспомогательного технологического оборудования стана, так и собственно раскат. Одновременно температура металла возрастает за счет деформационного разогрева. Приращение температуры или ее стабилизация на каком-либо участке непрерывного сортового стана может происходить также в случае использования в линии стана средств промежуточного подогрева раската (прокатываемой полосы) проходных подогревающих печей или термостатов.

Обзор тепловых моделей (может, далеко не полный) показал, что все модели расчета температуры полосы в сортовых станах предназначены для начальной настройки оборудования, при этом предполагается, что настройка оборудования (скорости прокатки, начальный разогрев заготовки и т. д.) во время прокатки остается постоянной. Также не было попыток сформировать модель и создать систему управления, позволяющие непосредственно при прокатке управлять изменением температуры (например, за счет межклетевого охлаждения поддерживать ее постоянной), или вносить корректировки в случае ошибки при первоначальном расчете.

1.4. Современные технологии редуциционной и редуционно-растяжной прокатки труб

1.4.1. Схемы редуциционной прокатки

Общей характеристикой процесса непрерывной обработки металла, в частности и редуцирования труб, служит отношение возможной скорости входа металла (v_{i+1}) в последующую по ходу процесса клеть к скорости выхода из предыдущей (v_i), т. е.

$$\omega = v_{i+1}/v_i. \quad (1.1)$$

При $\omega = 1$, количество металла, выходящее из одной клетки в единицу времени, равно его количеству, захватываемому последующей клетью [81].

Непрерывный процесс в условиях $\omega < 1$ протекает в том случае, когда $v_i > v_{i+1}$, т. е. когда из предыдущей клетки в единицу времени выходит больше металла, чем его может принять за это же время последующая клеть.

Вследствие этого при прокатке между клетями образуется петля, которая может быстро увеличиваться. При прокатке труб видимое искажение профиля наступает при коэффициенте ω значительно меньшем единицы. В этих случаях могут образоваться вздутия металла или «гармошка», при этом наблюдается утолщение стенки трубы [81].

В тех случаях, когда видимого искажения трубы обнаружить не удастся, металл между соседними парами валков испытывает осевые усилия сжатия. На этом основании для процесса прокатки величину $\omega < 1$ принято называть коэффициентом подпора.

При $\omega > 1$, что имеет место при $v_i < v_{i+1}$ последующая клеть способна (теоретически) пропустить в секунду металла больше, чем его выходит за это же время из предыдущей клетки.

Когда ω незначительно больше единицы, при редуцировании труб имеет место утонение стенки. Если прокатка ведется в условиях $\omega > 1$, то в прокатываемой трубе всегда возникают напряжения растяжения.

Для процесса прокатки величину $\omega > 1$ принято называть коэффициентом натяжения, или натяжением. На редуционно-растяжных станах введено понятие пластического межклетевого натяжения трубы. Коэффициент пластического натяжения трубы принято рассматривать как отношение осевого напряжения трубы в межклетевом промежутке к величине сопротивления деформации трубы в текущий момент времени [82].

Максимальная величина коэффициента пластического натяжения в стане ограничивается двумя факторами: тянущей способностью валков и условиями разрыва трубы в стане.

В результате исследований, проведенных В.П. Анисифоровым [82], установлено, что при суммарном обжатии трубы в стане до 50...55 % величина максимального коэффициента пластического натяжения ограничивается тянущей способностью валков (рис. 1.23). При дальнейшем увеличении суммарного обжатия она ограничивается условиями разрыва трубы в стане и уменьшается с уменьшением диаметра готовой трубы.

Разрыв трубы должен произойти при значениях $z_i < 1$, поскольку уравнение предельного состояния при редуцировании труб имеет вид $\sigma_z - (-\sigma_\varphi) = \sigma_s$. Отсюда и предельное отношение $\frac{\sigma_z}{\sigma_s} = z_{\max}$ также будет меньше единицы. Значение максимального коэффициента пластического натяжения, при котором происходит разрыв трубы, называется критическим и определяется экспериментально.

Как показали исследования, проведенные Г.А. Гуляевым и В.Ю. Юргеленасом, значение максимального коэффициента пластического натяжения зависит прежде всего от температуры деформированного металла. С увеличением температуры значение z_{\max} уменьшается. Уменьшение z_{\max} происходит также с ухудшением пластических свойств деформируемого металла [83, 84].

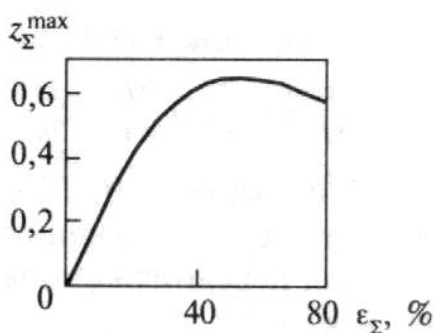


Рис. 1.23. Зависимость максимального коэффициента пластического натяжения от суммарного обжатия по диаметру

Следует отметить, что разрыв трубы должен происходить между клетями, поскольку металл здесь находится в менее упрочненном состоянии, чем в клетях. Следовательно, чем больше расстояние между клетями редуционного стана, тем больше вероятность разрыва труб [85, 86].

Во избежание разрыва трубы на практике не допускают величины коэффициента пластического натяжения больше 0,75...0,80 [82], а также стремятся к возможно меньшему расстоянию между клетями.

Величина деформации трубы при редуцировании определяется условиями устойчивости ее в калибре. При малых обжатиях трубы по диаметру в круглом калибре без оправки происходит уменьшение ее периметра. С увеличением степени редуцирования может наступить момент, когда контур трубы становится неустойчивым и труба искривляется (подламывается). Величина критического частного обжатия по диаметру, при которой происходит потеря устойчивости трубы, зависит от условий прокатки и, в первую очередь, от соотношения диаметра и толщины стенки редуцируемой трубы.

Исследования условий потери устойчивости трубы при редуцировании, проведенные А.А. Шевченко, показали, что при отношении $D/s < 28$ устойчивость трубы практически не зависит от величины деформации (рис. 1.24) и максимальная деформация при редуцировании толстостенных труб определяется условиями захвата, мощностью стана и другими факторами. Редуцирование тонкостенных труб ($D/s > 40$) практически нецелесообразно при критической деформации менее 1 % [87].

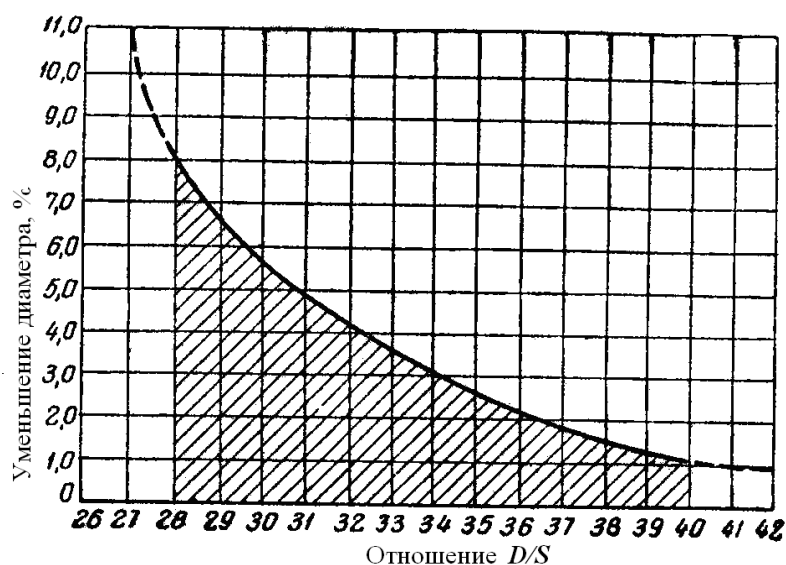


Рис. 1.24. Зависимость критического частного обжатия в клетях от отношения диаметра трубы к толщине стенки

Существенное влияние на величину критического обжатия, при которой может происходить потеря устойчивости, оказывает натяжение. С увеличением натяжения критическое обжатие увеличивается, т.е. увеличивается частное обжатие в клетки и количество занятых клеток редуционного стана уменьшается. Следовательно, натяжение значительно расширяет деформационные возможности редуционного стана [85, 86].

При редуцировании без натяжения среднее относительное обжатие по диаметру в одной клетки $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \cdot 100\% = 4..5\%$, а при редуцировании с натяжением эта величина достигает 7...12 % [81, 82, 87].

Величина критического частного обжатия в клетки напрямую зависит от равномерности деформации в калибре при прокатке. Как было сказано выше, большая равномерность деформации достигается за счет увеличения количества валков, замыкающих калибр.

В расчете редуцирования труб с натяжением, помимо определения калибровок и распределения обжатий по клетям стана, важной составляющей является определение требуемого скоростного режима. Распределяя определенным образом обороты по клетям стана, в итоге получают трубы заданной геометрии, точности и качества поверхности. Конструктивные свойства стана, характеристика привода, температура нагрева труб, свойства стали вносят свои особенности в расчет. Расчет принято начинать с распределения общего обжатия по клетям, далее определяют геометрию калибров и затем уже скоростной режим [90-92].

Однако в некоторых случаях такой подход бывает неверным [88, 89]. На практике пользуются следующей примерной схемой [89]: производительность определяет входную скорость; из геометрии исходной и конечной трубы получают общее натяжение, общую вытяжку и скорость выхода; определяют обороты первой клетки (по опытному катающему диаметру); распределяют обжатие и общее натяжение; рассчитывают катающие диаметры по клетям; по клетевым вытяжкам и соотношениям катающих диаметров получают искомые числа оборотов. Данная схема применяется к станам, имеющим клетки с индивидуальным приводом [89].

Отдельное место при выборе схемы прокатки занимает вопрос калибровки валков. Для получения труб с наружной поверхностью хорошего качества, правильной формы сечения и точными размерами необходимо выбрать рациональную форму каждого калибра при заданном среднем его размере. Неправильное соотношение размеров калибров может привести к незаполнению или переполнению калибра трубой, результатом чего может быть повышенная поперечная разностенность или подрезы в области выпусков калибров [94].

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие три формы калибров: круглый калибр с прямыми выпусками, круглый калибр с выпусками по дуге окружности и овальный калибр. Первые два типа применяются, как правило, для двухвалковых клеток с регулируемым положением валков. Большинство трехвалковых редуционных клеток изготавливается без регулировки положения валков. Нарезка ручья на валках производится в собранном виде в клетки на специальных фрезерных станках круглой фрезой, выдвинутой на определенное расстояние за плоскость осей валков. При этом получается калибр овальной формы [94]. Для характеристики формы калибра очень удобно пользоваться понятием овальности калибра в виде отношения величины ширины калибра к высоте калибра. Ниже приведен краткий обзор методик расчета формы калибров.

Метод А.А. Шевченко. В работе [81] приводятся графики уширения при редуцировании труб разных диаметров. Поскольку калибровки выполнялись различными калибровщиками на основании интуиции и опыта, то естественно, что абсолютные значения уширений принимались от 0 до 5 мм и выше. Чтобы выявить какие-либо закономерности, автор анализирует процесс, происходящий от захвата трубы валками до полного охвата трубы валками, т.е. полного заполнения трубой калибра. Положение начальной точки соприкосновения вала с торцом задаваемой трубы определяется размерами калибра и трубы. Здесь возможны два случая:

- 1) если труба круглая и калибр имеет незначительную овальность, то начальная точка соприкосновения находится на боковой поверхности вала;

2) если труба овальная, то при задаче ее в овальный калибр начальная точка соприкосновения будет находиться на вершине калибра.

В обоих случаях после соприкосновения трубы с валком начинается деформация поперечного сечения трубы, с преобладанием в значительной степени деформации сплющивания, т.е. изменение формы поперечного сечения без заметного изменения периметра трубы. Деформация сплющивания, которую А.А. Шевченко называет внеконтактной деформацией, распространяется во все стороны от точки соприкосновения трубы с валком. При этом в плоскости, перпендикулярной к оси прокатки, сплющивание ограничивается поверхностью калибра, так же как и вдоль оси прокатки по направлению к выходу. В сторону заднего конца трубы сплющивание распространяется на расстояние, определяемое размерами и механическими свойствами трубы. При установившемся процессе характер деформации сплющивания сохраняется.

Вследствие сплющивания профиля трубы перед сечением входа в валки существенным образом изменяются размеры трубы, что вызывает в свою очередь значительное отклонение фактических величин обжатия по высоте, уширения, угла захвата, длины очага деформации от расчетных. После окончательного заполнения трубой калибра деформация сплющивания прекращается. В работе отмечается, что максимальная величина уширения наблюдается в плоскости первоначального соприкосновения трубы с валком, а в процессе дальнейшей деформации величина уширения может даже уменьшиться.

Для проверки изложенных выше соображений были проведены опытные прокатки труб с различными размерами на ряде редуционных станов. Прокатываемые трубы затормаживали в клетях и обмеряли. На основании этих экспериментальных данных А.А. Шевченко рекомендует три формулы для расчета величины абсолютного уширения трубы при редуцировании [81]. Следует отметить, что полученные формулы применимы только для калибров двухвалковых станов.

Метод А.П. Чекмарёва и Г.И. Гуляева [93]. Длительная эксплуатация двухвалковых редуционных станов, работающих без натяжения, а также трехвалковых, работающих без натяжения и с натяжением, показала, что наиболее прием-

лемой формой калибра является овальная с коэффициентом овализации $\theta_i = \frac{b_i}{h_i}$.

Как правило, калибровки редукционных и калибровочных станков, работающих без натяжения или с небольшими натяжениями, рассчитываются из условия положительного уширения в каждом калибре, т.е. ширина задаваемой в калибр трубы меньше ширины калибра.

Для выявления геометрических связей овальности калибров с размерами задаваемой трубы и калибров авторами было сделано допущение, что уширение отсутствует. В конечные расчетные формулы была внесена поправка, учитывающая уширение трубы.

Авторами была предложена следующая формула для определения овальности калибра с учетом уширения:

$$\theta = \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^q,$$

где q – эмпирический коэффициент, которым учитывается, в зависимости от условий прокатки, свободное уширение. При выборе величины q авторы рекомендуют руководствоваться следующими соображениями. При прокатке стали марок 10, 20, 35, 45, а также низколегированных сталей на новых редукционных и калибровочных станах и станах, имеющих хорошее техническое состояние, следует принимать $q = 1,5$. При прокатке труб на редукционных станах устаревшей конструкции и станах, имеющих неудовлетворительное техническое состояние, следует принимать $q = 1,9 \dots 2,1$. При прокатке нержавеющей сталей следует принимать $q = 3,5$, чтобы металл трубы не соприкасался с ребрами валков во избежание налипания металла на валки, вызывающего дефект «ёлочка».

Недостатком рассмотренных формул является отсутствие объективности в выборе эмпирического коэффициента q , которым не учитываются относительная толстостенность трубы, величины натяжения между клетями, влияние механических свойств металла и др.

Метод А. М. Звягинцева [95], Ф. А. Данилова и др. [85]. Он был разработан на Первоуральском новотрубном заводе для расчета калибров двухвалковых редуционных станов, работающих без натяжения или с натяжением. Авторы считают, что, начиная от момента соприкосновения трубы с поверхностью калибра, по мере перемещения трубы возрастает контактная поверхность. Пока контактная поверхность невелика, преобладает деформация сплющивания профиля. По мере роста контактной поверхности, а следовательно, и роста равнодействующей сил трения в очаге деформации сплющивание контура затрудняется и начинает возрастать продольная деформация, т.е. вытяжка. При этом изменение толщины стенки трубы в вершине происходит по направлению к центру сечения трубы, а в зоне выпусков – к центру и наружу. Таким образом, уширение трубы складывается из двух факторов: уширения вследствие смятия контура и уширения за счет увеличения толщины стенки в зоне выпусков. Ввиду того, что сплющивание значительно превосходит утолщение стенки, последним пренебрегают, и в дальнейшем при расчетах ширины калибров утолщение стенки не учитывается.

В работе [95] утверждается, что величина смятия, а точнее, величина приращения ширины трубы вследствие смятия профиля достигает 15...20 % от обжатия по высоте в данной клетке. В работе [85] пределы интервала величин смятия расширены на основании опытных данных по редуционным станам Первоуральского новотрубного завода. Принимается, что величина смятия находится в пределах 15...35 % в зависимости от толщины стенки редуцируемых труб.

Таким образом, в этой методике определения формы и размеров калибров валков редуционных станов учитываются величина частного обжатия в данной клетке и толщина стенки (влияние последней учитывается только качественно). Количественная зависимость носит чисто экспериментальный характер, поэтому формулы имеют ограниченную область применения.

Метод П. Грюнера. Методика, предложенная в работе [96] для расчета овальности калибров редуционных станов, применима для двухвалковых и трехвалковых клетей. Автор считает, что при обжатии трубы по диаметру в круглом калибре необходимы выпуски во избежание подрезки трубы буртами валков. Эти

выпуски создаются в виде тангенциальной прямой или соответствующей дуги окружности. В трехвалковых клетях выпуск получается при построении калибра дугой эллипса, имеющего тот же периметр, что и расчетный наружный периметр трубы.

П. Грюнер принимает, что овальности калибров и частные обжатия по клетям в большинстве клеток одинаковы, поэтому имеют место равенства:

$$\theta_i = \theta_{i+1} = \theta_{i-1} = \dots = \theta.$$

Далее автор вводит соотношения:

$$\zeta = \frac{b_i}{b_{i+1}},$$

$$B_{i+1} = B_i(1 - \varepsilon_{i+1})$$

где B_i , B_{i+1} – длины дуг эллипсов, образующих данный и последующий калибры; b_i , b_{i+1} – ширина данного калибра и последующего калибра; ε_{i+1} – частное обжатие в последующем калибре. Соответственно овальность калибра авторы предлагают рассчитывать как

$$\theta_i = \frac{2}{\zeta_i(1 - \varepsilon_i)}.$$

Зависимость величины ζ от ε для трехвалковых калибров дается П.Грюнером в следующем виде:

ε	0,03	0,05	0,08	0,10	0,12
ζ	0,990	0,988	0,985	0,980	0,975

Этими же формулами автор рекомендует пользоваться при расчетах двухвалковых калибров. Однако зависимость величины ζ от ε несколько другая.

Недостатком рассмотренной методики следует считать то, что в ней не учитываются натяжения, относительная толстостенность трубы и механические свойства металла. Коэффициенты овальности калибров определены из опытов, что, как известно, сужает область применения подобных формул.

Метод фирмы «Kocks» [97]. Западно-германская фирма «Kocks» является одним из поставщиков трубного оборудования, и в том числе редуционных ста-

нов. На рис. 1.25 приведена схема построения калибра и основные обозначения. В основу расчета положено отсутствие свободного уширения трубы в калибре и даже наличие утяжки. За средний диаметр калибра принята удвоенная высота данного калибра, т.е. $d_i = 2h_i$, тогда $\Delta d_i = 2y_i = d_{i-1} - d_i$, где y_i – абсолютное обжатие в калибре.

При условии отсутствия уширения

$$h_i = \frac{d_i}{2},$$

$$b_i = h_i + y_i.$$

При построении калибра с утяжкой коэффициент отрицательного уширения $k = 0,6...1,0$.

Таким образом, для расчета размеров калибров редукционных станов, работающих с натяжением, принято наличие отрицательного уширения. Коэффициент утяжки k выбирается по опытным данным. Рекомендации относительно выбора k в зависимости от толщины стенки трубы, натяжения, механических свойств металла трубы и прочих факторов отсутствуют.

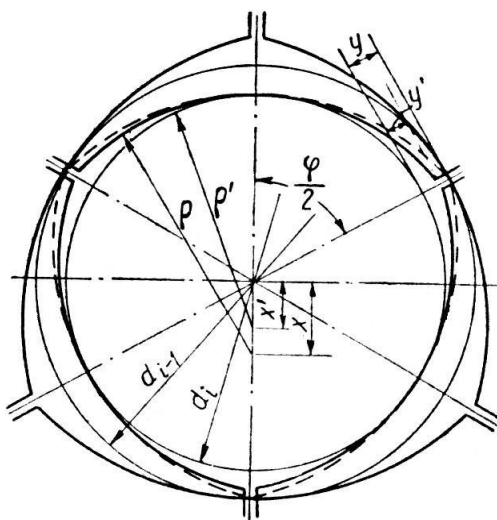


Рис. 1.25. Схема построения калибра фирмы «Kocks»

Метод Г.И. Гуляева [98]. Описываемый ниже метод расчета формы калибров редукционных станов является развитием методики [95], рассмотренной выше, для многовалковых редукционных станов, работающих с натяжением. Если для двухвалковых станов показатель q в формуле обычно больше или, в крайнем

случае, равен единице, то для многовалковых станов этот показатель может быть как больше, так и меньше единицы, т. е. редуцирование возможно с уширением, без уширения и с утяжкой. Ниже приведены рекомендованные значения q , полученные на основании многолетней заводской практики и опытных данных:

Стали	Станы		
	Двухвалковые	Трехвалковые	Четырехвалковые
Углеродистые	1,5	1,23	1,10
Нержавеющие	2,8...3,5	2,40	1,85

Однако вследствие появления трехвалковых станов, работающих с утяжкой трубы, авторами была сделана попытка найти общую закономерность для выбора величины q .

Калибры многовалковых клеток рассматриваются как часть двухвалкового калибра, имеющего те же высоту, радиус и частную деформацию (обжатие по диаметру). Поэтому, зная ширину двухвалкового калибра, можно определить ширину соответствующего ему многовалкового калибра:

$$b_{ai} = -e_i \cdot \sin \alpha + \sqrt{(e_i \cdot \sin \alpha)^2 + b_i^2},$$

где b_{ai} – ширина калибра, образуемого a валками;

b_i – ширина соответствующего двухвалкового калибра;

e_i – эксцентриситет калибра;

α – угол, зависящий от числа валков, $\alpha = 90 - 180/a$;

a – число валков, образующих калибр.

Величина q для любого калибра будет рассчитываться по формуле:

$$q_i = \lg\left(\frac{b_{ai}}{h_i}\right) / \lg\left(\frac{100}{100 - \varepsilon}\right),$$

где ε – частное обжатие в клетке; h_i – высота калибра (расстояние от оси калибра до дна калибра).

Из анализа формул следует, что с увеличением числа валков показатель степени уширения q снижается, т.е. овальность калибров уменьшается.

Выбор частного обжатия трубы по диаметру и соответственно необходимой овальности калибра влияет на качество протекания процесса без переполнения калибра и образования продольных заусенцев. Однако известно, что при редуцировании возникает разностенность трубы по ее периметру, что обусловлено сложным характером трехмерного формоизменения металла [99, 100]. В результате неравномерности интенсивности деформации по дну калибра и по бурту возникает внутренняя граненность труб. Количество возникающих граней в два раза больше, чем количество валков образующих калибр.

Приведенные выше методики предполагают, что овальность калибра во всех клетях является величиной постоянной. Компания «Mannesmann» (Германия) [101] дает рекомендации по распределению овальностей калибров в линии редуционного стана. Постоянная величина овальности калибра вызывает образование внутренней граненности, которую можно избежать, если овальность калибра от клетки к клетке будет отличаться на 0,4 %.

В работе [102] авторы, на основе моделирования трехмерного формоизменения металла при редуцировании с помощью МКЭ, исследовали процесс возникновения поперечной разностенности с учетом геометрических особенностей объемного очага деформации. Авторы показали, что на контакте металла с валком в областях очага деформации, близких к выпускам калибра, возникают продольные растягивающие напряжения, что связано с интенсивным проскальзыванием валка. В зоне выпуска за счет механизма сжатия металла валками происходит локализация деформации, приводящая к разностенности. В этих зонах возникают продольные сжимающие напряжения. Также приложение натяжения уменьшает величину продольных сжимающих напряжений в зоне выпуска калибра, что снижает величину деформации и уменьшает разностенность трубы [102].

Для избегания возникновения продольных растягивающих напряжений, возникающих в области выпусков калибра из-за интенсивного проскальзывания валка авторы [103] предложили схему калибра со смещенным эксцентриситетом.

На рис. 1.26 штриховой линией показан контур описанной окружности калибра.

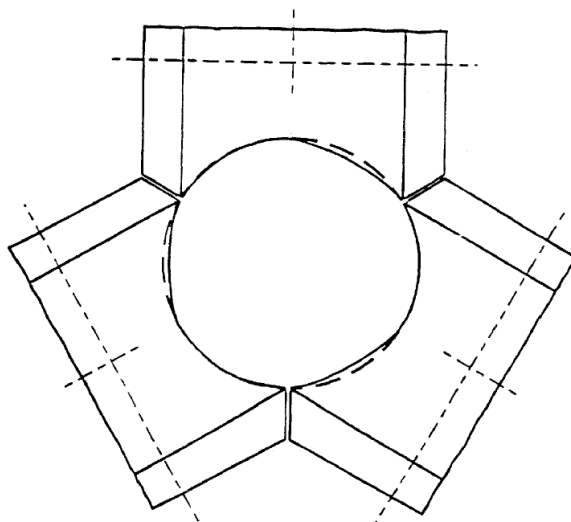


Рис. 1.26. Калибр по US6047578

1.4.2. Влияние технологических параметров на изменение толщины стенки трубы

Вопросами изменения средней толщины стенки при деформировании труб без оправки, в частности при редуцировании, посвящено много работ отечественных и зарубежных исследователей. В большинстве работ рассматривается изменение толщины стенки при редуцировании без натяжения [81, 104–113]. Результаты указанных работ подвергнуты довольно полному анализу в трудах [84, 114]. Остановимся более подробно на анализе основных существующих зависимостей, позволяющих определить изменение средней толщины стенки при редуцировании труб с натяжением.

Первое теоретическое исследование процесса было выполнено Ф.Нойманном и Д. Ганке [113]. В основу решения положено уравнение связи между напряжениями и деформациями и упрощенное условие пластичности.

Уравнение связи между напряжениями и деформациями представлено в виде

$$\frac{\sigma_r - \sigma_{cp}}{\ln \frac{s_{i-1}}{s_i}} = \frac{\sigma_z - \sigma_{cp}}{\ln \lambda_i} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_{cp}}{\ln \frac{d_{i-1} - s_{i-1}}{d_i - s_i}}, \quad (1.2)$$

где $\sigma_\rho, \sigma_z, \sigma_\theta$ – радиальное, осевое и тангенциальное напряжения;

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_\rho + \sigma_z + \sigma_\theta).$$

В уравнении (1.2) авторы [113] радиальное и тангенциальное напряжения выразили через осевое напряжение. Для этого использовали зависимость

$$\sigma_\rho = \sigma_\theta \frac{2s}{d}, \quad (1.3)$$

полученную из решения равновесия сил, действующих на трубу в поперечном направлении, и упрощенное условие пластичности

$$\sigma_z - \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (1.4)$$

После соответствующих преобразований авторы [62] получили основное уравнение процесса при редуцировании с натяжением:

$$\begin{aligned} & [2Z(-\nu + 1) + (1 - 2\nu)] : [Z(1 - \nu) + (1 + \nu)] : [Z(1 - \nu) - (2 - \nu)] = \\ & = \ln \frac{s_{i-1}}{s_i} : \ln \lambda_i : \ln \frac{d_{i-1} - s_{i-1}}{d_i - s_i}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} + \frac{s_i}{d_i} \right)$ – показатель тонкостенности трубы. Зависимость (1.5) в работах

[62, 96] решена графически.

Г.И. Гуляевым и В.А. Юргеленасом [84], а также Анисифоровым [115] выражения для расчета толщины стенки в зависимости от коэффициента пластического натяжения получены на основании уравнений (1.2) и (1.4).

Авторы [84], учитывая неравномерное распределение радиальных напряжений по периметру калибра, уточняют формулу (1.3) при помощи экспериментально найденных коэффициентов k_1 и k_2 :

$$\sigma_\rho = k_1 \left(\frac{s}{d} \right)^{k_2} \sigma_\theta. \quad (1.6)$$

С учетом уравнения (1.6) зависимость (1.5) авторами [84] представлена в следующем виде:

$$Z = \frac{0,5(\sigma_i + \sigma_{i-1})}{\sigma_{sj}} = \frac{\ln \lambda_i (2 - T_{cp}) + \ln \alpha (1 + T_{cp})}{\ln \lambda_i (2 - T_{cp}) - \ln \alpha (1 - T_{cp})}, \quad (1.7)$$

где $\ln \alpha = \ln \frac{d_{i-1} - s_{i-1}}{d_i - s_i}$, $T_{cp} = \left[\left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right)^{k_2} - \left(\frac{s_i}{d_i} \right)^k \right] \frac{k_1}{2}$.

В.П. Анисифоров [115] ввел в выражение (1.3) коэффициент предпочаговой деформации: $\sigma_p = \eta \frac{s}{d} \sigma_\theta$.

Зависимость толщины стенки от коэффициента пластического натяжения в работах [115, 116] получена в аналитическом виде:

$$s_i = \left(1 + \beta_i \frac{\Delta d_i}{d_i} \right) s_{i-1}, \quad (1.8)$$

где
$$\beta = \frac{2 \left(1 - \eta \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right) \left(1 - \frac{Z}{2} \right) - 1}{\left(1 - \eta \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right) \left(1 - \frac{Z}{2} \right) - 1}, \quad \eta = 1 + \frac{\sqrt{s_{i-1} d_i}}{2l_i}.$$

К этому же классу принадлежит формула В.В. Швейкина и Г.Я. Гуна [109]

$$s_i = s_{i-1} \left(\frac{d_{i-1}}{d_i} \right)^A, \quad (1.9)$$

где $A = \frac{1-Z}{2-Z}$ при $Z \geq 0$; $A = \frac{1-Z}{2+Z}$ при $Z \leq 0$.

Здесь $Z = 0,5(Z_i + Z_{i-1})$.

Выражение для расчета толщины стенки было определено В.Л. Колмогоровым с использованием вариационных методов [117]. При решении задачи было сделано два основных допущения. Принято, что неравномерность деформации не оказывает существенного влияния на среднюю величину стенки трубы. Силы трения на поверхности соприкосновения в небольшой степени влияют на течение металла при редуцировании и ими можно пренебречь. На основании этих допущений принята схема равномерной осадки трубы в калибре. В результате решения получена формула

$$s_i = s_{i-1} \left(\frac{d_{i-1}}{d_i} \right)^k, \quad (1.10)$$

где

$$k = 0,5 \left(1 - \frac{3Z}{\sqrt{4 - 3Z^2}} \right).$$

Выражение (1.10) в работе [117] представлено графически.

Идентичная формула на основании приближенного метода решения объемных задач вязкопластического течения, или метода приведения к квазиплоской задаче, выведена для тонкостенных труб Г.Я. Гуном [119].

Для толстостенных труб авторами [119] предложена другая формула:

$$\frac{U_1}{(1 - U_1)^{2-1,5k}} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{3(1-k)} \frac{U_2}{(1 - U_2)^{2-1,5k}}, \quad (1.11)$$

где U_1 и U_2 – отношения внутреннего и наружного радиусов трубы до и после деформации; r_1 и r_2 – наружный радиус трубы до и после деформации.

Все рассмотренные выше формулы для расчета толщины стенки при редуцировании не учитывают влияние на изменение толщины стенки ряда факторов: сил трения, неравномерности деформации по длине очага деформации, различного воздействия переднего и заднего натяжений, радиуса вала.

В.В. Швейкин и П.Н. Ившин [120] изменение толщины стенки при редуцировании также определяли вариационными методами. Составляя уравнения мощностей внешних и внутренних сил без допущений, сделанных в работах [117, 119], авторы работы [120] получили математические зависимости, связывающие изменение толщины стенки и основные параметры редуцирования.

В работе [120] вариационное уравнение решали численно на ЭВМ. Построенные в результате решения графики аппроксимировали формулой

$$\Delta s = \frac{\Delta d \frac{s}{d}}{1 - 2 \frac{s}{d}} \left[1 - a \left(1 - \frac{s}{d} \right) \right], \quad (1.12)$$

где

$$a = 0,5 + \frac{s}{d} \left(1 + 5,7 \frac{s}{d} \right) - 0,3 f \frac{\sqrt{R \Delta d}}{d} + Z(0,67 + 0,38Z), \quad (1.13)$$

$$Z = Z_{i-1} - \frac{x_0^2}{R_g \Delta d} (Z_{i-1} - Z_i).$$

Здесь s и d – толщина стенки и диаметр трубы по середине очага деформации; x_0 – расстояние от плоскости выхода трубы из валков до нейтрального сечения, где горизонтальная скорость валка равна скорости движения трубы.

Формула (1.12) служит для определения изменения толщины стенки трубы в одной клетке. Для определения суммарного изменения толщины стенки авторами [120] предложены графики.

Авторы работы [117] решали задачу изменения средней толщины стенки трубы при редуцировании с натяжением, составляя уравнения мощностей внешних и внутренних сил, авторы [118] получили математические зависимости, связывающие изменение толщины стенки и основные параметры редуцирования:

$$\frac{\Delta s}{d_{i-1}} = \frac{1}{2}(2p^* + m - 1) - \sqrt{(2p^* + m - 1)^2 - 4p^*m \left[1 - \frac{4(1 - p^*)}{2 - n^*(2 - m)} \right]}, \quad (1.14)$$

где $p^* = \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}$ – показатель тонкостенности исходной трубы;

$$n^* = 1 - \frac{4m}{(2 - m)\frac{\lambda - 1}{\lambda}} + \frac{m}{2 - m}; \quad m = \frac{\Delta d}{d_{i-1}} \text{ – обжатие трубы по диаметру в калибре.}$$

Зависимость (1.14) учитывает неравномерность деформации по диаметру трубы и калибровку валков (для овального калибра). Задача решена для течения жесткопластической среды.

Анализируя вышеприведенные зависимости, можно утверждать, что основным параметром (при редуцировании труб с натяжением), влияющим на изменение толщины стенки, является натяжение. В работе [118] показано, что больший вклад в изменение толщины стенки вносит переднее натяжение. Также изменение толщины стенки имеет сильную зависимость от обжатия трубы по диаметру, показателя тонкостенности исходной трубы и радиуса валка по дну калибра.

Все вышеприведенные математические зависимости, описывающие поведение толщины стенки трубы при редуцировании с натяжением, не учитывают таких технологических параметров как относительный диаметр валка, количество

валков замыкающих калибр, сопротивление металла пластической деформации и скоростное упрочнение металла при прокатке в калибре.

1.4.3. Конструктивные особенности редуционных клетей и станов

Станы безоправочной продольной прокатки труб, используемые в трубопрокатных и трубопрессовых установках, однотипны. Поэтому все их оборудование унифицировано. В зависимости от назначения их подразделяют на три типа: калибровочные, редуционно-калибровочные и редуционно-растяжные [121, 122].

Калибровочные станы предназначены для получения точного диаметра готовых труб. В этих станах труба подвергается незначительной деформации. Станы обычно имеют от 3 до 7 двухвалковых клетей. Такие станы установлены в старых агрегатах с автоматическим, реечным или пилигримовым станами.

Редуционно-калибровочные станы предназначены для уменьшения наружного диаметра труб и их калибрования. Наличие таких станов в агрегате способствует повышению его производительности, расширяя сортаментные возможности агрегатов в сторону получения труб меньших диаметров и большей длины. Редуционно-калибровочные станы обычно имеют 12...20 клетей, работающих без натяжения или с небольшим натяжением. При прокатке труб в таких станах уменьшение диаметра может производиться не больше, чем на 40...45 %, при этом толщина стенки увеличивается [121].

Третий вид – редуционно-растяжные станы. Их основное назначение – получение тонкостенных труб небольших диаметров. Эти станы работают с натяжением, при этом толщина стенки утоняется или сохраняется неизменной в зависимости от применяемой степени натяжения. Можно отметить, что если прокатка в редуционно-калибровочных станах обычно несколько снижает точность толщины стенки готовых труб, то при прокатке в редуционно-растяжных станах, наоборот, поперечная разностенность уменьшается. Редуцирование с натяжением приводит к образованию утолщенных концов труб, которые в дальнейшем должны быть отрезаны. Чем больше степень редуцирования (а она может достигать

75...80 %) и больше применяемое натяжение, тем больше увеличиваются длина и масса этих концов. Поэтому считается экономически оправданным применение этих станов, когда исходная труба имеет длину не менее 15...20 м.

Конструктивно трехвалковые рабочие клетки могут быть двух типов: когда распределение момента между валками осуществляется внутри клетки (рис. 1.27, *а*), а клетка имеет один вводной вал; другой тип клетки (рис. 1.27, *б-д*) имеет три вводных вала, а распределение момента осуществляется в дополнительной шестеренной клетке различной конструкции [124]. Первый тип клетки существенно упрощает привод стана, облегчая весь стан, но по долговечности значительно уступает второму. Для горячей прокатки труб в различных агрегатах применяют рабочие валки обоих типов, хотя в настоящее время предпочтение отдают второму типу, несущая способность которого значительно выше [121].

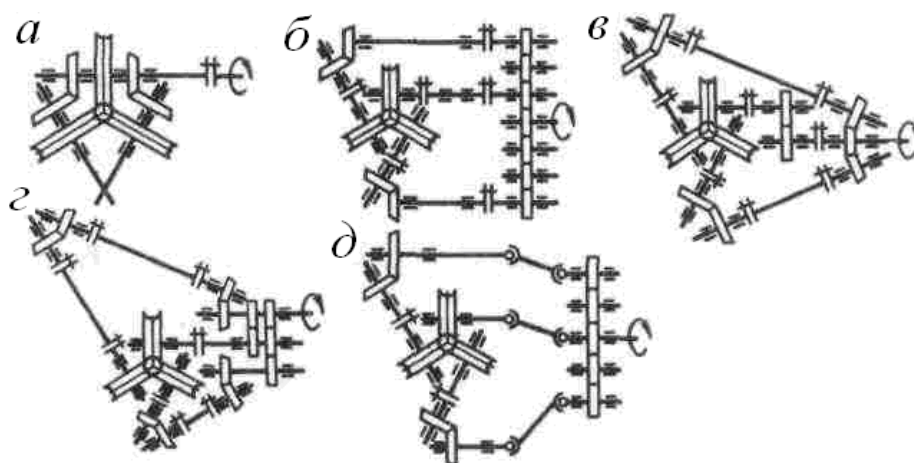


Рис. 1.27. Кинематические схемы трехвалковых клеток:
а – с одним вводом; *б, в, г, д* – с тремя вводами

В станах старой конструкции оси валков имели радиальную регулировку для компенсации износа калибров в процессе прокатки. Современные клетки, как правило, такой регулировки не имеют, что обеспечивает повышенную жесткость клетки. Лишь чистовые клетки иногда делают с регулируемым раствором валков.

По способу перевалки станы также можно разделить на две группы. В станах первой группы перевалку осуществляют мостовыми кранами; другая группа станов характеризуется тем, что замену клеток производят специальными механизмами (постаментами или напольными тележками).

Перевалка может быть осуществлена по одной клетке или блоками. Главная линия каждой клетки состоит из одноручьевых рабочих валков, шпиндельных соединений, комбинированного редуктора и электродвигателя (рис. 1.28, а, б) [125].

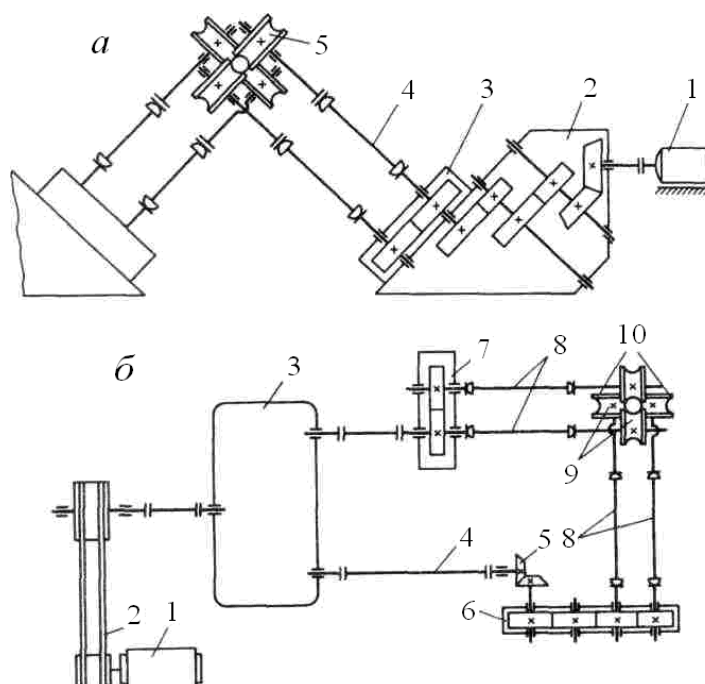


Рис. 1.28. Редукционный стан с индивидуальным приводом валков (горизонтальное расположение двигателей): а – с горизонтальными клетями; б – с вертикальными клетями;
а – 1 – двигатель; 2 – редуктор; 3 – шестеренная клеть; 4 – шпиндель;
5 – рабочие валки; б – 1 – электродвигатель главного привода; 2 – силовая передача; 3 – шестеренная клеть; 4 – промежуточный вал; 5 – коническая передача; 6, 7 – цилиндрические редукторы; 8 – шпиндель; 9, 10 – горизонтальные и вертикальные валки

Привод рабочих клетей станов продольной безоправочной прокатки несет важную технологическую функцию: тип привода в значительной мере предопределяет возможный режим натяжения как в установившемся процессе, так и в переходный период. В этой связи привод станов весьма разнообразен. Принципиально его можно разделить на три вида (рис. 1.29): групповой, индивидуальный и комбинированный (дифференциально-индивидуальный и дифференциально-групповой).

Наиболее простым является групповой привод: от одного двигателя приводятся валки всех клетей, для чего используют, например, редукторы с коническими передачами. При таком приводе изменять величину натяжения нельзя и прокатку осуществляют с режимом натяжения, характерным для каждого конкретного стана. Групповой привод использовали в старых калибровочных и редукцион-

ных станах. В настоящее время он не имеет особого применения. Создание таких станов может быть оправдано только в тех случаях, когда предполагают получать очень узкий сортамент труб.

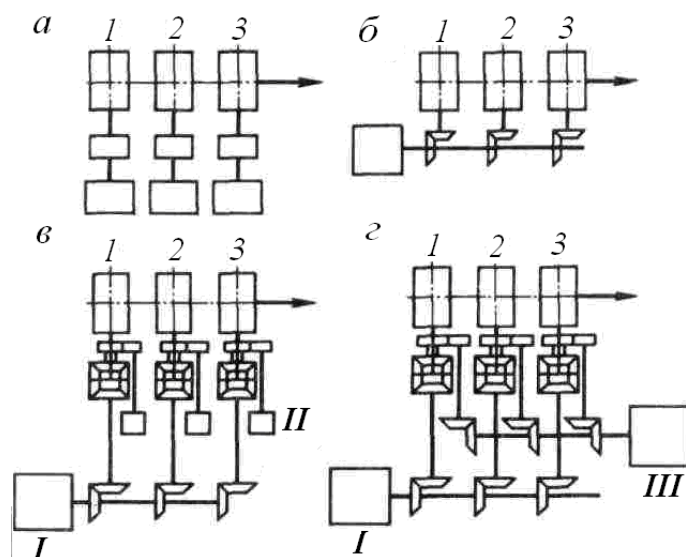


Рис. 1.29. Принципиальные схемы привода рабочих валков редуционных станов: *а* – индивидуальный; *б* – групповой; *в, г* – комбинированные (дифференциальные): 1,2,3 – клетки; I – главный групповой двигатель; II – вспомогательный индивидуальный; III – вспомогательный групповой

Второй вид привода – индивидуальный. Это универсальный вид привода, пригодный как для редуционно-калибровочных, так и для редуционно-растяжных станов.

Станы с индивидуальным приводом валков позволяют осуществлять прокатку без натяжения или с заданным натяжением. Такие станы обеспечивают регулировку скоростей валков и натяжение в широких пределах.

В то же самое время применение индивидуального привода обычно влечет увеличение суммарной мощности двигателей и требует в случае использования этого привода для редуционно-растяжных станов применения систем стабилизации скорости валков. Без таких систем переходные процессы затягиваются во времени и в результате увеличивается масса утолщенных концов, что, в конечном счете, несколько уменьшает выход годного проката. В качестве разновидности этой группы можно указать на станы, в которых привод двух смежных клеток осуществляется от одного двигателя (спаренный привод).

Комбинированный привод позволяет регулировать отношение скоростей валков и натяжение в достаточных для практических целей пределах.

Сущность комбинированного привода заключается в том, что частота вращения валков каждой клетки является результатом суммирования скоростей, передаваемых двум звеньям дифференциала независимыми трансмиссиями. Таким образом, обязательным узлом комбинированного привода является дифференциальная передача. В зависимости от того, какие трансмиссии осуществляют передачу вращения к дифференциалу, могут быть различные виды привода. В тех случаях, когда каждая трансмиссия в отдельности представляет групповой привод, привод стана называют дифференциально-групповым. Он осуществляется от двух двигателей – главного и вспомогательного. Если одна трансмиссия является групповым приводом, а другая – индивидуальным (чаще всего гидроприводом), то такой привод носит название дифференциально-гидравлический. Комбинированный (дифференциальный) привод характеризуется в сравнении с индивидуальным большей жесткостью, меньшей установочной мощностью двигателей. Вместе с тем механическое оборудование стана в этом случае заметно усложняется и удорожается. При больших скоростях редуцирования в дифференциальных редукторах возникают соответственно чрезмерно большие окружные скорости и надежность работы заметно снижается. Поэтому дифференциальный привод не применяют в тех случаях, когда необходимо в редукционном стане иметь скорость больше 10...12 м/с.

Дифференциально-групповой привод может быть двух видов, когда значительное вращательное движение на валки снимается с солнечного колеса или с водила (рис. 1.30). В первом случае обеспечиваются более высокие скорости прокатки; второй способ позволяет передавать больший момент. В редукционно-растяжных станах, применяемых для производства бесшовных труб, обычно используют второй тип привода, т.е. вращение снимают с водила, обеспечивая достаточную долговечность редуктора даже при тяжелых режимах работы стана.

Дифференциально-гидравлический привод сложнее дифференциально-группового, но позволяет производить более тонкое регулирование скоростного режима, обеспечивая наибольшую степень натяжения.

В этих приводах в качестве вспомогательных используются гидравлические двигатели. Гидравлический привод представляет собой сочетание гидронасоса и гидродвигателя. Он имеет более жесткую характеристику и позволяет осуществлять регулировку скорости валков не только в каждой клетке, но и во всех клетях одновременно.

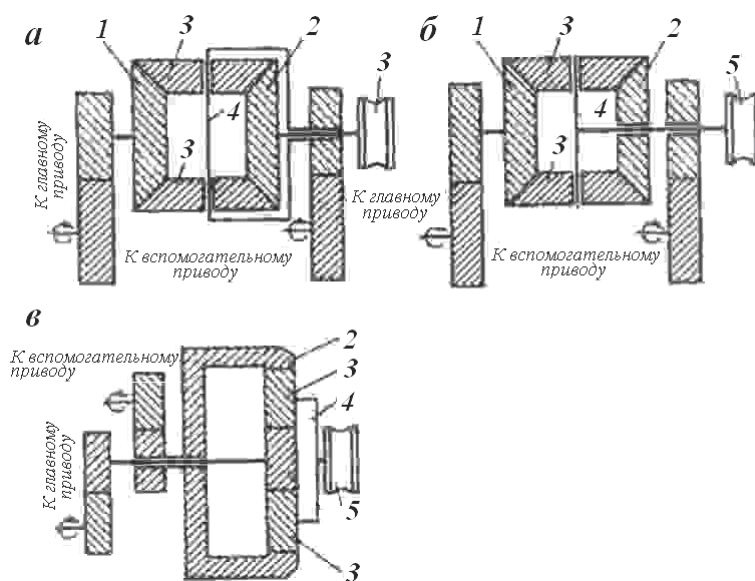


Рис. 1.30. Схемы дифференциальных передач:

- а* – конический дифференциал с приводом валков от солнечного колеса; *б* – то же с приводом от водила; *в* – цилиндрический дифференциал с приводом от водила;
 1 – солнечная шестерня; 2 – солнечное колесо; 3 – сателлитная шестерня;
 4 – водило; 5 – рабочий валок

Калибровочные и редукиционные станы продольной прокатки весьма разнообразны по конструкциям: двухвалковые станы, предназначенные для редуцирования труб широкого сортамента, имеют индивидуальный привод. Различие заключается в том, что в одном из них применены наклонно расположенные двигатели и понижающие редукторы с цилиндрическими шестернями. Другой стан имеет горизонтальные двигатели, но в этом случае в редукторах применяют конические передачи. Поскольку эти станы не используют для прокатки с большим натяжением, то расстояние между клетями можно иметь достаточно большим, а двигатели расположить на каждую сторону от оси прокатки в одну линию.

В редукционно-растяжных станах расстояние между клетями доведено до минимально возможной величины и поэтому двигатели приходится располагать в два ряда с обеих сторон стана. Техническая характеристика этих станов приведена в табл. 1.1.

Как показано на рис. 1.27, схемы трехвалкового стана могут быть различными. В первую очередь, это относится к станам, в которых используют клетки с тремя вводами. Различия в схемах приводят к большему или меньшему числу зубчатых передач, к разному числу конических шестерен. Стремление уменьшить количество зубчатых зацеплений в некоторых схемах повлекло применение шарнирных шпинделей.

На рисунке 1.31 показан стан с дифференциально-групповым приводом конструкции «ВНИИметмаш», имеющий трехвалковую клеть с внешней раздачей момента. В этом стане применена схема, приведенная на рис. 1.27, в.

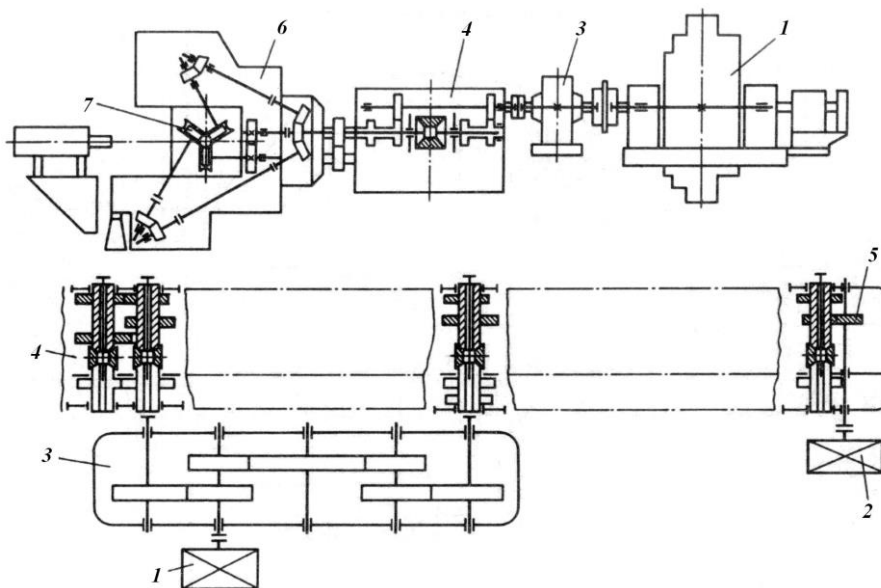


Рис. 1.31. Кинематическая схема редукционного стана с дифференциально-групповым приводом:

1,2 – основной и вспомогательные двигатели; 3 – цилиндрический редуктор; 4 – дифференциал; 5 – цилиндрическая передача; 6 – рабочая клеть; 7 – рабочий валок

Редукционный стан с рабочей клетью, имеющей три ввода, оказывается более тяжелым и громоздким. Замена клетей такого стана требует большего времени, так как в этом случае необходимо втрое большее число муфт. По сравнению со станом, имеющим клетки с одним вводом, рабочие клетки с тремя вводами обладают большей несущей способностью, более долговечны, и их целесообразно

применять для более тяжелых режимов редуцирования, в частности при производстве труб с натяжением.

Современные двухвалковые и все трехвалковые клетки уже не имеют указанных регулировок. В них калибр на валках растачивается без разборки клетки. Клеть устанавливают на специальном станке, который обеспечивает вращение всем валкам. Борштанга станка расположена строго по оси калибра и на конце несет резец либо фрезу необходимого размера. Имеется несколько разновидностей подобных станков.

Таблица 1.1

Характеристика станов продольной прокатки без оправки [123]

Параметры	Станы						
	Калибровочный	Редукционно-калибровочный			Редукционно-растяжной		
Число клеток	5	7	11	12	20	24	24(8+6)
Тип клеток (раствор валков)	Нерегулируемый и регулируемый		Нерегулируемый		Нерегулируемый и регулируемый		Нерегулируемый
Число валков	2	2	2	2	2	3	3
Диаметр вала, мм	400	400	500	450	330	300	450/330
Межклетевое расстояние, мм	600	700	450	600	330	300	420/300
Диаметр трубы, мм:							
на входе	89	83	140	57	98	38	33
на выходе	146	140	148	102	102	83	133
Толщина стенки, мм:							
на выходе		до 18	до 14	4-18	3,5-13	3-6	
на входе	до 25	до 18	до 14	5-18	3-13	3-6	2,8-6
Привод: тип							
	Индивидуальный					Дифференциальный	Индивидуальный
	Односторонний	Двухсторонний				групповой	односторонний
Мощность, кВт	5x55	7x100	11x300	12x250	20x250	2x1400	24x160
Крутящий момент, МНм	-	0,02	-	0,023	0,05...0,009	0,05...0,008	0,008
Масса, т клетки стана	150	180	3,2	5,5	1,4	0,82	240

Появление таких станков значительно упростило и ускорило изготовление калибров и повысило их точность. Клетки стали проще и жестче, но срок службы калибров между переточками сократился, а следовательно, увеличилось число перевалок на редуционных станах. Это обстоятельство явилось одной из важных причин разработки механизированных, групповых перевалок, требующих не большой затраты времени.

Для того чтобы получить калибр необходимой точности, надо обеспечить минимальный осевой люфт валков. В практике принято люфт ограничивать величиной 0,05 мм. Это обеспечивается двумя способами: применением на фиксированной в осевом направлении опоре каждого вала сдвоенных регулируемых роликовых конических подшипников и практически беззазорной установки стаканов подшипниковых узлов в расточке корпуса клетки, либо применением на фиксированной опоре регулируемого сдвоенного радиально-упорного шарикового подшипника.

При конструировании опор валов рабочих валков большое внимание уделяется уплотнениям подшипников, поскольку они работают вблизи горячего металла в среде воды, пара и окалины.

Наиболее надежной защитой подшипников от окружающей среды является применение сдвоенных севанитовых уплотнений в сочетании с лабиринтом, смазываемым густой смазкой. Однако в трехвалковых клетях в большинстве случаев по условиям компоновки удастся разместить лишь одно севанитовое уплотнение и лабиринт. Такое сочетание уплотнительных средств надо считать минимально допустимым для обеспечения нормальных условий работы подшипников.

Валки рабочих клеток изготавливают из обычного отбеленного чугуна либо из легированного чугуна с отбеленным слоем в зоне расположения калибра. Марка чугуна – СПХН-65. Твердость отбеленного слоя составляет 52HRC.

При проектировании редуционного стана всегда стремятся к минимальному шагу рабочих клеток [85, 103, 121, 124] . Это требование имеет особое значение при редуцировании штучных труб, поскольку в этом случае длина и масса утолщенных концов, существенно влияющих на расходный коэффициент металла

на агрегате в целом, зависят от шага клетей. Шаг клетей зависит, прежде всего, от диаметра рабочих валков и от компоновки привода стана.

1.5. Постановка задачи разработки и исследования технологии производства простых сортовых профилей и труб

Приведенный выше литературно-патентный обзор известных схем непрерывной прокатки простых профилей и редуцированной прокатки труб позволяет судить об актуальности изучаемой тематики и о перспективах новых разработок в этой области. Более того, из обзора можно выявить некоторые направления дальнейшего совершенствования техники и технологии производства профилей.

Стремление совместить процессы обработки металлов оправдано современными тенденциями развития промышленного производства металлоизделий. Срок морально оправданной жизни машин непрерывно сокращается, а вновь создаваемые современные машины требуют расширения марочного и типоразмерного сортамента металлургии. Малотоннажность и быстропереналаживаемость оборудования в последние годы становятся определяющими признаками современности и выживаемости металлургического производства.

Известно, что преобладающая доля энергозатрат связана с нагревом металла, поэтому малотоннажное производство может рассматриваться как рентабельное при сокращении количества нагревов и подогревов металла в цикле его получения и обработки. Разработка совмещенных агрегатов для горячей деформации, в частности прессово-прокатных агрегатов и комплексов, в основном преследует цели максимального использования тепла предыдущего технологического передела, сокращения времени и материальных затрат при переходе от одного типоразмера металлопродукции на другой.

Удачным совмещением разнородных процессов металлообработки следует считать такое, при котором не только достигается значительное энерго- и металлоэкономия, сокращаются трудоемкость, металлоемкость оборудования и потребные производственные площади, но и совершенствуются сами участвующие

в совмещении процессы. В качестве примера такого совмещения можно назвать прессование с передним натяжением пресс-изделий, совмещающих операции прессования и правки профилей [126, 128]. При этом кроме уменьшения количества адьюстажного оборудования сокращаются также и производственные площади, уменьшается количество транспортных операций и достигается, хотя и незначительное, энергосбережение. Прессование с натяжением решает и многие технологические проблемы, присущие процессам прессования и правки в их традиционном представлении. В частности, при прессовании благодаря снижению контактных давлений на калибрующем пояске за счет переднего натяжения уменьшается износ матриц.

В этом плане перспективным и возможным представляется такое совмещение процесса прессования с непрерывным прокатным станом, при котором кроме основной цели (экономия энергии, получение длинномерных изделий и экономия металла) достигается и очевидное совершенствование технологий и конструкций оборудования прессования.

Обзор редуционно-растяжных станов показал, что в основном прокатка труб производится в овальных калибрах. Из-за неравномерности интенсивности деформации по диаметру возникает разнотолщинность трубы по диаметру (внутренняя граненность трубы). Избежать этого вида дефекта возможно при прокатке трубы в круглом калибре, не имеющем эксцентриситета ручьев.

В известных способах совмещения прессования и непрерывной прокатки посредством петли возникают потребности в дополнительных производственных площадях [24]. Также является затруднительным управление температурой металла, находящегося в петле. Избежать этих проблем представляется возможным при прямом совмещении процесса прессования с непрерывной прокаткой. При этом в промежутке между горизонтальным гидравлическим прессом и непрерывным станом появляется возможность управления температурой профиля за счет применения охлаждающих сопел и/или тепловых экранов для уменьшения тепловых потерь при транспортировании профиля.

После горячей деформации металла в ряде случаев необходима термообработка. Известно много вариантов регламентированного охлаждения сталей непосредственно в потоке (на желобе прессы). Следовательно, за станом прокатки сплошных и полых профилей необходима установка линии охлаждения. В зависимости от требуемой скорости охлаждения профиля для получения заданной структуры установка может менять свое состояние.

Таким образом, выбранную конфигурацию прессово-прокатного агрегата, включающего горизонтальный гидравлический пресс, установку предварительного управления температурой, непрерывного прокатного стана и установку регламентируемого охлаждения можно считать удачной и перспективной с точки зрения получения труб и профилей с низкими допусками по геометрическим показателям и заданной структуры металла.

Поскольку разрабатываемая структура прессово-прокатного агрегата и технология прямого совмещения циклического и непрерывного процессов пластического формоизменения является составными частями мини-металлургического комплекса и технологии малотоннажного производства проволоочной заготовки и труб из коррозионно-стойкой стали, то управление температурным режимом обработки является принципиальным и позволяет в одном технологическом потоке осуществить закалку аустенитных сталей. Тепловой режим прессования при заданной случайной вариации величины сопротивления деформации достаточно основательно проанализирован в работе [129]. В современной литературе нет описаний математических моделей температурного режима непрерывной сортовой и редуционной прокатки, совмещенных напрямую с прессованием. Оперативное управление температурно-скоростным режимом совмещенной прокатки требует привлечение нетрадиционных систем привода клеток и систем автоматики.

Во всех известных конструкциях сортопрокатных и редуционных клеток используется электромеханический привод с длинными и сложными кинематическими цепями, с тиристорным или частотным управлением скоростью прокатки и межклетевыми натяжениями.

Встраивание в непрерывный мини-металлургический комплекс малотоннажного широкоассортиментного производства современных групп и блоков сортопрокатных и редукционных клетей бессмысленно из-за невозможности рентабельности производства. Высокая стоимость этих прокатных средств и систем индивидуального управления скоростью прокатки, потребность в большом парке клетей, обеспечивающем широкоассортиментность производства, сложность и длительность переналадок, быстрый износ многочисленных элементов трансмиссий привода валков удлиняют или исключают окупаемость капитальных вложений.

Из обзора следует целесообразность применения как для сортовой, так и редукционной прокатки многовалковых, например, четырехвалковых калибров. При электромеханическом приводе увеличение количества валков усложняет конструкции клетей и вынуждает применять либо привод не всех валков, либо вводить сложные трансмиссии. Редукторы, шпиндели, дополнительные зубчатые зацепления при любом качестве изготовления порождают люфты, увеличивающиеся по мере износа элементов привода. В момент входа полосы из-за люфтов возникает асимметрия очага деформации и непредсказуемый изгиб выходящего из клетки конца полосы. Изгиб требует установки сложных проводных клетей и летучих ножниц. Устранение концевых изгибов полос также является проблемой, решение которой позволяет снизить металлоемкость и упростить конструкции клетей и прокатных блоков.

В четырехвалковой клетке трудно обеспечить синхронный привод всех двухпорных валков [36], поэтому широкое распространение нашла консольная установка грибовидных валков. Для повышения жесткости клетки с такими валками целесообразно использовать простые калибры конических валков, при прокатке в которых в поперечном направлении на оси валков действует лишь проекция полного давления металла. Теория и технология прокатки сорта и труб в калибрах конических валков до сих пор не разработаны. Использование конических валков дает возможность регулировки размера калибра без параллельного смещения осей валков. Подушки валков при регулировании смещаются параллельно осям валков, что дает возможность дополнительного повышения жесткости. Правда, регули-

ровка в широком диапазоне возможна только применительно к квадратным калибрам конических валков. Но если использовать по рекомендации авторов [36] систему калибра квадрат–квадрат, то в группе могут использоваться конструктивно идентичные клетки. Диапазон регулировки размера квадратного калибра в этом случае не влияет на жесткость клетки и может быть достаточным для обеспечения всего маршрута прокатки в блоке или группе клеток.

Полностью отказаться от механической связи между осями валков и таким образом избавиться от шестеренных клеток, шпинделей и конических и червячных редукторов можно только за счет применения прямого индивидуального гидропривода всех валков в клетки, синхронизируемого самосогласованием, либо за счет установки в напорных и сливных линиях гидравлических делителей и сумматоров потоков. Если современные сортовые и редукционные клетки (даже поворотные) допускают чередование с взаимным разворотом осей валков на 90^0 , то гидроприводные клетки плети позволяют применять любые углы разворота. Гидравлический привод валков полностью устраняет люфты, а дроссельное или регуляторами расхода управление скоростью прокатки делает ненужными дорогостоящие тиристорные и частотные преобразователи. Наклон механической характеристики гидромотора при бесконечном расходе насосной станции определяется только сжимаемостью рабочей жидкости, но в любом случае механическая характеристика остается более жесткой, чем у асинхронных моторов и электродвигателей постоянного тока. Серийно выпускаемые гидромоторы по кинематическим и энергетическим параметрам аналогичны электромоторам общего применения. Проблемой применения гидропривода в прокатных клетях является разработка новой конструкции высокомоментного гидромотора.

Применение гидромоторов для привода клеток позволяет уменьшить массу оборудования прокатных блоков или групп клеток в десятки раз в сравнении с современными при равной мощности. Следует помнить, что эффективность гидроприводных клеток может быть реализована только при наличии насосно-аккумуляторной станции коллективного пользования, в частности на участке прессово-прокатного агрегата. Чем больше в цехе устанавливается мини-

металлургических модулей, тем эффективнее использование насосно-аккумуляторной станции.

В итоге, задачами разработок оборудования и технологии совмещения прессования с непрерывной прокаткой, а также исследования новой технологии сортовой и редуционной прокатки в четырехвалковых калибрах конических валков являются следующие:

- предложить компоновочное решение прессово-прокатного агрегата, встраиваемого в мини-металлургический комплекс оборудования модульного типа для производства, в частности, проволочной заготовки и труб из коррозионно-стойких сталей для атомной энергетики;
- разработать и создать математическую модель высокомоментного гидромотора, пригодного для прямого индивидуального привода валков сортовых и редуционных клетей;
- предложить конструктивный вариант универсальной четырехвалковой клетки для сортовой и редуционной прокатки;
- разработать структуры системы автоматического управления скоростным режимом непрерывной прокатки с заданными межклетевыми натяжениями, совмещенной напрямую с прессованием;
- на основании лабораторных исследований собрать необходимую и достаточную априорную информацию о закономерностях прокатки прутков и труб в четырехвалковых калибрах конических валков;
- проанализировать в инженерной постановке задачи кинематические и энергосиловые параметры сортовой прокатки по схеме круг–квадрат–круг в четырехвалковых калибрах конических валков;
- создать конечно-элементную модель и определить параметры напряженно-деформированного состояния при прокатке прутков по схемам круг–квадрат, квадрат–круг и труб по схеме круг–круг;
- выполнить постановку и провести вычислительный эксперимент для построения статистически обоснованной модели формирования заданной толщины стенки

трубы при четырехвалковой (в круглых калибрах) редуционно-растяжной прокатке;

– построить математические конечно-разностные модели температурных режимов обработки прутков и труб в совмещенном агрегате прессования–непрерывной прокатки–регламентированного охлаждения проката и реализовать их на примере изготовления теплообменных труб из стали аустенитного класса с их закалкой в линии редуционно-растяжного стана;

– применить результаты разработок и исследований для совершенствования практикума по курсам «Основы технологических процессов ОМД» и «Технология пластической обработки специальных сплавов»;

– разработать техническое предложение по постановке на производство гидроприводных прокатных сортовых и редуционных клетей по заказу генерального проектировщика мини-металлургического модуля для изготовления проволоочной заготовки и труб из нержавеющей стали с переработкой железистых кварцитов Михайловского месторождения.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОВМЕЩЕННОГО ПРЕССОВО-ПРОКАТНОГО АГРЕГАТА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРУТКОВ И ТРУБ

2.1. Перспективы применения гидропривода валков прокатных клетей

Проблемы люфтов и связанная с ними асимметрия очагов деформации и изгиба передних концов прокатываемых профилей эффективно решаются установкой индивидуального гидропривода валков клетки с многовалковым калибром. Эти клетки запатентованы (патент РФ №2087220) и описаны в работах [130, 131]. Компактность конструкции клетки достигается применением специальных гидромоторов с большим крутящим моментом, не требующих применения дополнительных понижающих редукторов, и механической независимостью приводов валков. Скоростное согласование валков в таких клетях достигается за счет многопоточных гидравлических делителей [132, 133]. Более того, как показал опыт эксплуатации клетей с индивидуальным гидроприводом, скоростное согласование требуется лишь при холостом ходе привода для предотвращения остановки одного или одновременно нескольких валков из-за различия моментов холостого хода. Под нагрузкой, когда полоса находится между валками, легко достигается автосогласование скоростей валков даже при наличии факторов асимметрии очага деформации, поскольку минимальная мощность прокатки потребляется гидроприводом при отсутствии изгиба полосы на выходе. Индивидуальный гидравлический привод полностью исключает влияние люфтов на симметрию прокатки.

Компактная однокорпусная клеть без трансмиссий и редукторов предельно проста конструктивно и удобна в эксплуатации, а самое главное, допускает произвольный осевой разворот по отношению к соседним клетям для задания любых углов кантовки. Легко видеть (рис. 2.1, *a*), что блок или группа, собранная из подобных двухвалковых клетей, может адаптироваться оперативной переналадкой к любой из известных систем калибров, то есть к любой схеме чередования кле-

тей. Корпус клетки опирается на поворотные цапфы, а рабочая жидкость подводится либо посредством гибких рукавов, либо через коллекторы, смонтированные в поворотных цапфах. Гидропривод в последнем случае монтируется на стойках станины. При объединении таких клеток в группы и при монтаже блока даже нет особой потребности в проводковых устройствах благодаря исключению отгибов выходящих концов полос за счет гидравлического скоростного согласования. Столь же компактную конструкцию и возможность произвольного осевого разворота имеют и четырехвалковые клетки, показанные на рис. 2.1,б и рис. 2.2. На последнем рисунке показана промышленная четырехвалковая клетка для холодной калибровки прутков квадратного поперечного сечения 16x16 мм, подаваемых на штамповку железнодорожных костылей в непрерывном агрегате, установленном на одном из предприятий Свердловской области.

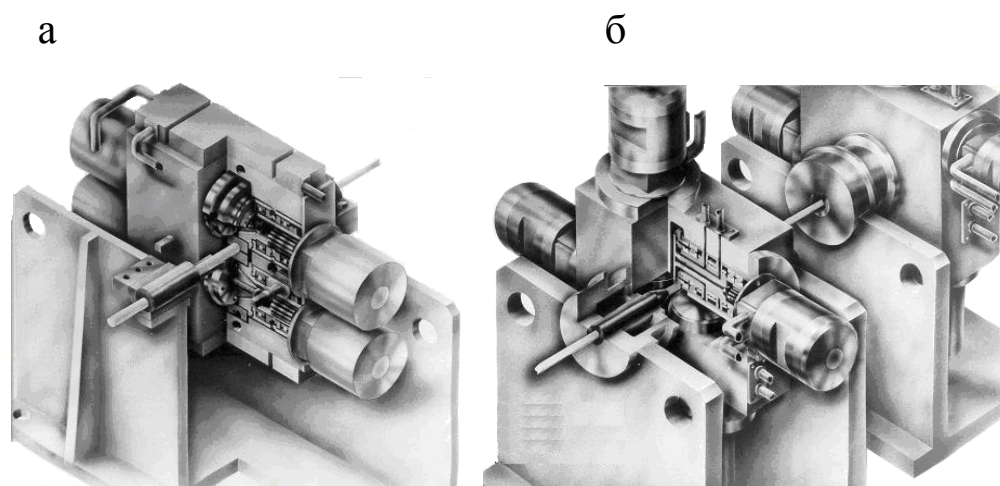


Рис. 2.1. Перспективные конструктивные варианты двух-(а) и четырехвалковых (б) прокатных клеток с индивидуальным гидравлическим приводом рабочих валков

Применение делителей потока взамен шестеренных клеток и устранение шпинделей из кинематической цепи привода полностью предотвращают возникновение высотной асимметрии очага деформации и, следовательно, снижают давление металла на направляющие поверхности и элементы проводковых устройств.

Кроме технической новизны и патентной защищенности, следует отметить и технологическую, а также и конструктивную эффективность гидропривода валков рабочих клеток блока, которые определяются общими свойствами

объемных гидравлических приводов, достаточно хорошо представленных в литературе [134–136].

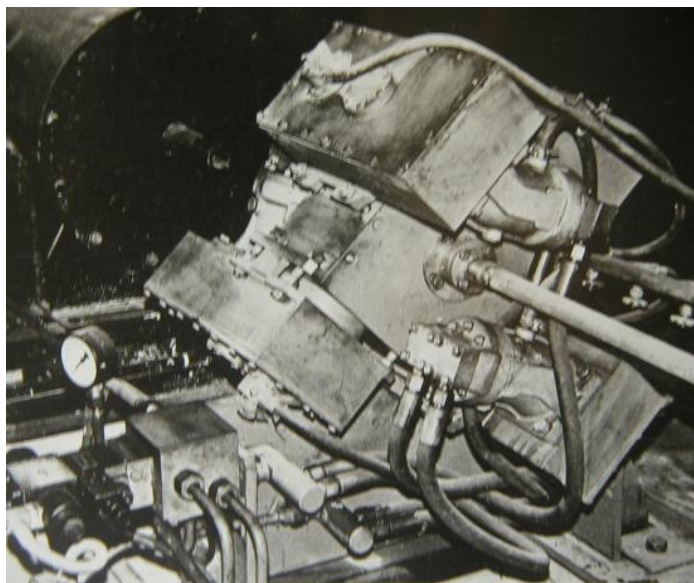


Рис. 2.2. Четырехвалковая калибровочная клеть с индивидуальным редукторным гидроприводом валков

К основным достоинствам и преимуществам гидропривода перед электромеханическими системами следует отнести:

- обеспечение более высокой надежности и резкое уменьшение простоев оборудования, поскольку в гидроприводе сравнительно просто реализуется резервирование; гидроаппаратура и объемные машины производятся на специализированных предприятиях и в настоящее время доведены до высокого уровня надежности; при использовании в металлургическом оборудовании электромеханических приводов постоянно возникают непреодолимые трудности в успешном конструктивном исполнении, в применении стандартных, серийно выпускаемых механизмов и узлов привода;
- простота и надежность предохранительных устройств гидроприводов защищает оборудование от перегрузок и снижает аварийность;
- уменьшение электрической и механической частей приводов и количества изнашиваемых узлов и деталей, так как централизованная насосная станция обслуживает большое число исполнительных механизмов; в гидроприводе не существует проблем преобразования вращательного движения в возвратно-

поступательное, снижается количество редукторов и существенно сокращается длина трансмиссий;

- повышение показателей ремонтпригодности; организация ремонта по агрегатному и узловому принципу; обеспечивается легкий доступ для техобслуживания, а сами гидравлические аппараты просто заменяются благодаря малым весу и габаритам;

- высокий уровень унификации гидроаппаратов и элементов привода, тогда как при электромеханическом приводе много разнотипного и нестандартного оборудования;

- высокая скорость и быстроедействие, на порядок превосходящее электромеханический привод;

- высокая приемистость гидроприводов и резкое снижение длительности переходных процессов при резком изменении технологических нагрузок (например, моментов прокатки);

- значительное упрощение систем автоматизации;

- высокая точность позиционирования гидроуправляемых механизмов, возможность реализации сложных законов движения, бесступенчатость и широкий диапазон регулирования; возможность работы в динамических режимах при частых включениях, остановках, реверсах;

- компактность и простота установки гидроустройства на корпусах технологических агрегатов;

- малые моменты инерции гидромоторов и гидроцилиндров привода; удельная масса объемных гидромашин составляет $0,5 \dots 1,8$ кг/кВт и $4,5 \dots 12,5$ кг/кВт – устройств электромеханического привода; на гидромоторы приходится не более 5% момента инерции приводимого ими механизма, поэтому время их разгона и торможения не превышает обычно нескольких сотых или десятых долей секунды;

- отсутствие ограничений в достижении практически любых технологических усилий и моментов;

- простота размещения оборудования привода, поскольку насосная или насосно-аккумуляторная станция размещаются произвольно в удобном месте, а на технологическом оборудовании размещаются только исполнительные механизмы (гидроцилиндры и гидромоторы);
- жесткость механической характеристики (особенно при наличии централизованной насосной станции большого расхода рабочей жидкости), обеспечивающая стабилизацию скоростного режима агрегатов при значительных изменениях технологических нагрузок; в случае оптимальной загрузки насосных станций жесткость механических характеристик гидропривода определяется только сжимаемостью рабочей жидкости и упругими деформациями трубопроводов.

Недостатками гидроприводов, особенно в металлургическом производстве, следует считать:

- повышение требований к точности изготовления гидроуправляемого оборудования;
- достаточно высокая культура технического обслуживания и повышенная квалификация обслуживающего персонала;
- ужесточение правил пожарной безопасности при использовании минерального масла в качестве рабочей жидкости в условиях горячего производства;
- организация постоянного контроля герметичности гидросистем.

Однако практика широкого применения гидроприводов в металлургии свидетельствует о преодолении перечисленных недостатков.

Устранение громоздких электромеханических приводов клеток позволяет объединить последние в блок, т.е. смонтировать поворотные кассеты на одной станине, что значительно облегчает работы по монтажу оборудования. Следовательно, появляется реальная возможность создать компактный, например, обжимной блок сортовой прокатки, масса которого не превысит 20 % от массы лучших образцов современного прокатного оборудования с электромеханическим приводом.

Жесткая механическая характеристика гидропривода важна при входе очередной полосы в непрерывную группу клеток, поскольку позволяет предотвра-

тить без дополнительных средств автоматизации временное скоростное рассогласование клеток в группе или блоке. Успешно эта проблема в блоках и группах клеток решается лишь за счет группового привода, снижающего технологические возможности оборудования за счет фиксации режима вытяжек.

Окружной люфт рабочих валков практически при любой конструкции шестеренной клетки и шпинделей находится в пределах от 0,3 до 8⁰. Мероприятия, направленные на снижение люфтов в линии привода валков, удорожают оборудование и затрудняют его эксплуатацию. Если даже в состоянии поставки оборудования окружной люфт снижен до минимума, то в реальных условиях эксплуатации, особенно при низком организационном уровне технического обслуживания, люфт появляется достаточно быстро и устраняется обычно только при очередном капитальном ремонте.

При периодической прокатке окружной люфт валков служит причиной не-санкционированного рассогласования скоростей валков в момент входа полосы и нерегулярного изгиба переднего конца заготовки, что ужесточает требования к конструкциям рольгангов и проводковых устройств. Если не вводить специальные механизмы компенсации люфтов перед задачей полосы, то практически каждый проход выполняется с одним ведущим и одним холостым валками. Известно, что любая асимметрия очага деформации при прокатке сопровождается перерасходом энергии и неравномерностью нагрузки в линиях привода валков. В связи с этим растет количество поломок элементов привода и снижается надежность прокатного передела.

Из практики прокатного производства известно много причин асимметрии очага деформации: различная шероховатость рабочих поверхностей валков, неравномерность подачи смазки, градиент температуры по высоте полосы, неравномерность механических свойств металла по толщине полос. Любая асимметрия в первую очередь проявляется изгибом заготовки на выходе из валков. Основным фактором, определяющим характер изгиба полосы, является величина высотной деформации. Кроме распределения деформации по высоте очага деформации на изгиб влияют условия трения.

При прокатке относительно высоких полос выходящий конец полосы изгибается в сторону гладкого вала, что объясняется асимметричным действием сил трения на контакте. Обжатие со стороны шероховатого вала становится больше среднего, и скорость выхода металла около этого вала выше, чем у гладкого. В то же время крутящий момент всегда выше на валке с большим коэффициентом трения. Таким образом, для выравнивания полосы на выходе из валков в случае асимметрии контактного трения необходимо уменьшить скорость шероховатого или недостаточно смазанного вала. С этой задачей успешно справляется неуправляемый гидропривод валков клетки. При возрастании момента прокатки на одном из валков растет соответственно гидросопротивление в линии подачи гидромотора этого вала. Происходит перераспределение потоков рабочей жидкости; валок с большим моментом тормозится, а другой ускоряется. Таким образом, осуществляется самовыравнивание полосы и устранение асимметрии. Потребляемая мощность после перераспределения потоков минимальна и равна мощности симметричной эквивалентной прокатки.

Симметричный выход полосы из валков может быть обеспечен саморегулированием потоков рабочей жидкости и в случае несимметричного входа полосы в валки. Например, если при прокатке высокой полосы она при входе отклонена в сторону нижнего вала, то на этом валке увеличивается обжатие и момент прокатки. Это приводит к отклонению полосы вверх на выходе из клетки. Гидросопротивление в напорной линии гидромотора привода нижнего вала возрастает и скорость снижается. Гидросистема реализует прокатку с минимальной мощностью и симметризирует выход полосы из валков.

В системе привода валков прокатной клетки делитель (сумматор) потоков исполняет роль шестеренной клетки, поскольку с помощью многопоточных делителей рабочую жидкость можно подавать постоянными и независимыми от нагрузки потоками к независимым приводам. В отличие от шестеренной клетки делитель потока устраняет окружные люфты валков и позволяет вводить практически любые скоростные рассогласования окружных скоростей валков за счет со-

ответствующей переналадки делителей (установкой подобранных дроссельных шайб).

Современные серийно выпускаемые делители в состоянии поддерживать потоки рабочей жидкости с точностью 0,5 % при значительных (до 30 %) отклонениях момента прокатки от номинального значения [137].

Компактное исполнение и возможность предельного сокращения расстояния между клетями делает их перспективными в технологиях редуционно-растяжной прокатки труб. Редуционный стан, собранный из показанных на рис. 2.1, б клеток, в сравнении с ныне эксплуатируемыми станами с электромеханическими приводами, характеризуется на порядок меньшей металлоемкостью, имеет простую и надежную систему автоматического управления скоростным режимом клеток и автоматического поддержания заданного режима межклетевого натяжения, например, с целью управления толщиной стенки прокатываемой трубы, существенно экономит производственные площади. В случае применения этих клеток в обжимных или черновых группах для безредукторного привода требуются высокомоментные моторы, серийного выпуска которых до настоящего времени нет ни у нас, ни за рубежом.

2.2. Перспективный вариант конструкции гидропривода валков

В качестве гидромоторов могут быть применены либо машины радиально- и аксиально-поршневого, либо роliko-лопастного типа соответствующей мощности. Принцип действия гидромотора роliko-лопастного типа подобен работе гидроповоротника, в котором за счет введения в конструкцию роlikов устраняется ограничение в угле поворота. Поэтому такой гидромотор можно рассматривать как гидроповоротник с неограниченным углом поворота. Кольцевой канал между ротором и статором-корпусом разделен роliками-разделителями на четыре или шесть полостей, которые во время вращения ротора поочередно являются напорными или сливными. Поскольку диаметры роlikов-разделителей равны диаметрам делительных окружностей шестерен на концах

роликов, связывающих кинематически ролики с валом ротора, то ролики во время работы гидромотора катятся без проскальзывания по поверхности между зубцами ротора, замыкают зоны нагнетания и выдерживают высокое давление в этих зонах. Зубчатое зацепление замкнуто таким образом, что продольные пазы роликов-разделителей во время вращения роликов и ротора всегда совпадают в угловом положении с зубцами ротора. Это позволяет зубцам проходить через ролики без нарушения замкнутости рабочих полостей кольцевого канала. Две другие области канала всегда связаны со сливными торцовыми отверстиями, которые через сверление в корпусе распределительного блока мотора выведены в общую сливную магистраль. Возникающий крутящий момент равен давлению жидкости, умноженному на площадь поперечного сечения и средний диаметр кольцевого канала. Возникающий крутящий момент при фиксированных конструктивных параметрах мотора зависит от разности давлений в напорной и сливной магистралях, а скорость вращения ротора определяется расходом рабочей жидкости в единицу времени.

Достоинствами мотора роliko-лопастного типа, в сравнении с поршневым, следует считать отсутствие трущихся частей в корпусе мотора и связанный с этим большой срок службы привода без потери паспортных характеристик. Кроме того, эти моторы, благодаря особенностям конструкции, могут устойчиво работать на сравнительно малых скоростях и обеспечивать большой крутящий момент, который определяется диаметром и размерами поперечного сечения кольцевой полости.

Мощность насосной станции в значительной степени зависит от типа выбранных гидромоторов. Наиболее рациональным вариантом установки гидромоторов на прокатные клетки следует признать такой, при котором на клеть устанавливается гидромотор определенного типоразмера в соответствии с моментом прокатки. В этом случае суммарный расход рабочей жидкости минимален. Однако при создании группы клеток с гидроприводом усложняется эксплуатация гидромоторов из-за широкого типоразмерного ряда.

Конструкция гидромотора роliko-лопастного типа, разработанная на кафедре ОМД УГТУ–УПИ [138], показана на рис 2.3. В состав гидромотора входят следующие основные части: корпус 1, выполняющий роль статора, образующий совместно с ротором 6 и щеками 5 и 7 замкнутый со всех сторон

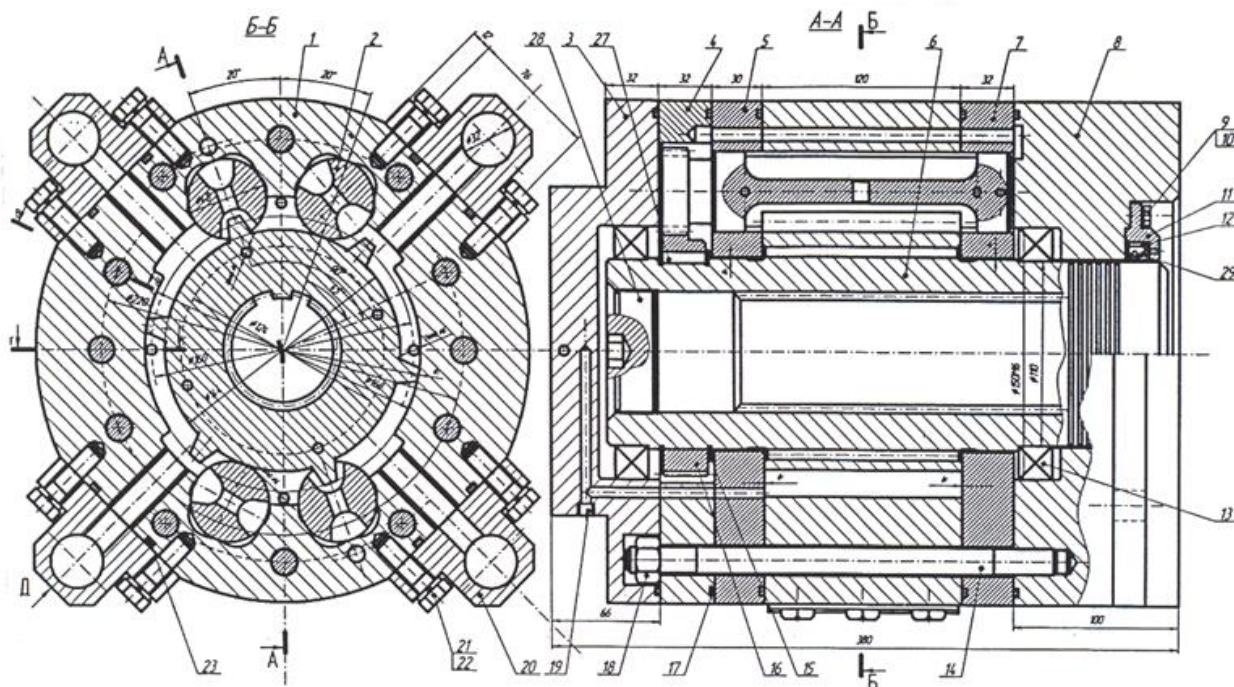


Рис. 2.3. Высокомоментный гидромотор роliko-лопастного типа конструкции УГТУ–УПИ

кольцевой канал; ротор 6, снабженный зубьями-поршнями, которые помещаются в кольцевой канал статорной части мотора; боковые щеки 6 и 7, образующие боковые стенки кольцевого канала статорной части; ролики-разделители 2, установленные с возможностью вращения в притертых подшипниках скольжения (расточках) щек 5 и 7. Главным приводным валом, механически связанным с роликами разделителями 2 и установленный с возможностью вращения в подшипниках качения 13, является ротор 6. Крышка 3 и плита 8 замыкают с двух сторон систему дренажа и предотвращающие утечки рабочей жидкости из корпуса гидромотора. Блок, включающий плиту 8, корпус гидромотора 1, щеки 5 и 7 и корпус редуктора 4 стягиваются в осевом направлении шпильками 14, воспринимающими давление осевого распора гидромотора. Крышка 3 крепится к корпусу 1 винтами 24, воспринимающими давление дренажа. На роторе 6, установленном в опорах качения, смонтировано зубчатое колесо 16 посредством

шпоночного соединения 28, связанное постоянным зубчатым зацеплением с шестернями роликов-разделителей 2. В корпусе статора 1 выполнены подводящий, сливной и дренажный каналы, а также система внутренних каналов, обеспечивающих подвод жидкости в рабочие полости статорной части гидромотора, слив жидкости из рабочих полостей низкого давления в дренаж всех утечек рабочей жидкости. Плита 8 одновременно выполняет функцию силовой опоры главного вала 6 и снабжена фланцем для крепления гидромотора на соответствующем механизме. Отверстия для подачи и слива рабочей жидкости допускают присоединение к внешним гидромагистралям как штуцерным, так и фланцевым способом. Вал 6 внутренней части снабжен шлицами для присоединения посредством шпинделя к приводным валкам прокатной клетки. Размеры сечения ротора 6 и шпинделя выбираются в соответствии с максимально допустимым крутящим моментом, определяемым площадью сечения кольцевого канала, формируемого ротором 6, корпусом 1 и щеками 5 и 7, давлением рабочей жидкости (настройкой предохранительных клапанов насосной станции) в полостях высокого давления и средним диаметром кольцевого канала гидромотора.

Основными конструктивными особенностями гидромотора роликолопастного типа являются: синхронное с ротором 6 вращение роликов-разделителей 2; минимальные зазоры между зубцами ротора и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса 1, а также между торцевыми поверхностями зубцов ротора и щеками 5 и 7; автоматическое уравнивание роликов-разделителей при действии на них давления рабочей жидкости для уменьшения крутящего момента в зубчатом зацеплении и снижения износа рабочих поверхностей роликов-разделителей и соответствующих расточек в корпусе 1 и в щеках 5 и 7.

Синхронизация роликов-разделителей обеспечивает возможность последовательного замыкания полостей высокого и низкого давления в кольцевом канале для создания крутящего момента при одновременном действии жидкости высокого давления на поверхность зубца ротора и на цилиндрическую поверхность ролика-разделителя в кольцевом канале. Продольные каналы роли-

ков-разделителей служат для пропускания зубцов-поршней через ролики-разделители.

Зазоры по контуру кольцевого канала предотвращают утечки рабочей жидкости и обеспечивают высокое давление в рабочих полостях кольцевого канала даже при сравнительно низком расходе жидкости и, следовательно, низкой скорости вращения приводного вала гидромотора. Требуемые по условиям надежной работы гидромотора зазоры обеспечиваются притиркой сопрягающихся поверхностей.

Автоматическое гидравлическое уравнивание роликов-разделителей достигается путем диаметральных сверлений между продольными каналами и за счет кольцевых проточек в корпусе 1, в которых создается давление, равное давлению в рабочих полостях кольцевого канала.

Кольцевой канал между ротором и корпусом роликами-разделителями разделен на четыре или шесть полостей, которые во время вращения ротора поочередно являются напорными или сливными.

Поскольку диаметры роликов-разделителей равны диаметрам делительных окружностей шестерен на концах роликов, то последние во время работы гидромотора катятся без проскальзывания по поверхности между зубцами ротора, замыкая зоны нагнетания и удерживая высокое давление рабочей жидкости в этих зонах.

Через коллектор 20 жидкость высокого давления подводится через сверление в корпусе 1 в две зоны кольцевого канала, которые замкнуты с одной стороны близлежащим зубцом ротора, а с другой – одним или другим роликом-разделителем. Зубчатое зацепление замкнуто таким образом, что продольные пазы роликов-разделителей во время вращения роликов и ротора всегда совпадают в угловом положении с зубцами ротора. Это позволяет зубцам проходить через ролики без нарушения замкнутости рабочих полостей кольцевого канала. Две других области канала всегда связаны со сливными торцевыми отверстиями, которые через радиальные сверления в статоре 1 выведены в общую сливную магистраль.

Возникающий крутящий момент равен давлению жидкости, умноженному на площадь поперечного сечения кольцевого канала и на средний диаметр кольцевого канала. Этот момент через ротор передается посредством шлицевого соединения на шпиндель, хвостовик которого выведен из корпуса гидромотора для присоединения к шейке рабочего вала клетки.

Возникающий крутящий момент при зафиксированных конструктивных параметрах гидромотора зависит от разности давлений в каналах напора и слива, а скорость вращения вала определяется расходом рабочей жидкости в единицу времени.

Наиболее пригодными для целей согласования скоростей валков можно считать делители и сумматоры потоков модели КД. В состоянии поставки эти аппараты имеют три настройки соотношений потоков при делении и суммировании за счет смены входных дросселей. При широком сортаменте профилей, когда настройка всего прокатного блока осуществляется каскадной схемой включения делителей, под каждую схему прокатки готовится свой набор дроссельных шайб и необходимость в регуляторах расхода полностью отпадает.

Наибольшую точность деления и суммирования потоков обеспечивают двухпоточные делители и сумматоры. При их расчете давления в более нагруженном отводе делителя p_{\max} и менее нагруженном подводе сумматора p_{\min} являются опорными. Расходы жидкости в отводах делителя без учета погрешности деления с достаточной для практики точностью определяются по формуле:

$$q = \mu f \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_0 - p_{\max})},$$

где p_0 – давление жидкости на входе делителя или на выходе сумматора;

μ – динамическая вязкость рабочей жидкости;

f – площадь проходного сечения входного дросселя;

γ – удельный вес жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Расход жидкости в подводах сумматора определяется аналогично:

$$q = \mu f \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_{\min} - p_0)}.$$

Зависимость динамической вязкости минерального масла от температуры можно с достаточной точностью определить по формуле:

$$\mu = \mu_{20} \left(\frac{20}{t} \right)^k,$$

где μ_{20} – вязкость масла при температуре 20°C;

t – рабочая температура масла;

k – коэффициент, характеризующий вязкость масла.

Точность деления потока $Q = q_1 + q_2$ при использовании дросселей в виде

диафрагм составляет:
$$\xi = \frac{2\mu^2 f^2 q \Delta p}{\gamma Q q_2},$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ (при $p_2 > p_1$) – разность давлений в отводах делителя;

q_2 – расход жидкости в более нагруженном отводе.

Для увеличения точности согласования скоростей валков в клетях целесообразно одновременное применение делителей и сумматоров потока.

В общей схеме питания приводов непрерывного блока более высокое качество скоростного согласования достигается при каскадной схеме включения делителей потоков вместо регуляторов расхода. Однако в этом случае время переналадки блока при переходе на другой типоразмер проката удлиняется из-за необходимости замены комплекта дроссельных шайб делителей и сумматоров. При использовании же регуляторов расхода на каждой клети настройка скоростного режима блока может осуществляться автоматически от центрального коллектора.

Промышленное использование прокатных клетей при производстве сортовой и полосовой стали, а также при теплой и холодной калибровке можно признать перспективным. Малая металлоемкость и компактность прокатного

оборудования, быстрая переналадка, простота управления скоростью прокатки очевидны и говорят об эффективности этого вида привода валков.

Из анализа работы многопоточных делителей и сумматоров потоков следует практическая возможность отказаться от шестеренных клетей в линиях приводов многих прокатных клетей.

Прокатные и калибровочные непрерывные блоки с гидроприводом приобретают уникальные технологические свойства и становятся единственно пригодными агрегатами получения сортовых и полосовых профилей на широко-сортаментных литейно-деформационных модулях в малотоннажном производстве.

В развитии техники и технологии прокатки на непрерывных гидроприводных блоках интерес представляет открывшаяся возможность автосогласования клетей и валков в случае неуправляемого подвода рабочей жидкости от коллектора к гидромоторам привода каждого валка. При фиксированном общем расходе жидкости моменты прокатки (т.е. давление во всех параллельных линиях гидропривода) устанавливаются в блоке на уровне, при котором общая потребляемая на прокатку мощность минимальна. Эта ситуация возможна при правильном подборе гидросопротивлений в линиях подвода рабочей жидкости к гидромоторам. Математическая модель гидропривода непрерывного прокатного стана позволяет рационально установить комплект регулируемых дросселей в цепях гидропитания приводов и рассчитать оптимальный вариант их настройки. Прокатный непрерывный блок с автосогласованием должен иметь две подсистемы питания: подсистема жесткого согласования, используемая при запуске блока, и подсистема неуправляемого автосогласования, к которой гидроприводы присоединяются при достижении стационарного режима прокатки.

В настоящее время разработаны на уровне технического проекта два типоразмера гидромоторов роliko-лопастного типа:

– ГМ 700 для сортопрокатных клетей обжимных групп и для привода валков брикетировочных прессов;

– ГМ 180 для привода четырехвалковых клеток редуционных и редуционно-растяжных трубопрокатных станов.

Основные технические характеристики этих моторов приведены в табл. 2.1.

Для двигателя ГМ180 выполнено имитационное моделирование и создана анимация его работы в реальном масштабе геометрического представления и времени. Модель гидромотора со снятыми корпусом и статорным блоком показана на рис. 2.4.

Таблица 2.1

Технические характеристики гидромоторов конструкции УГТУ–УПИ

ПАРАМЕТР	ГИДРОМОТОР	
	ГМ700	ГМ180
РАБОЧИЙ ОБЪЕМ, $\text{CM}^3/\text{ОБ}$	700	180
РАБОЧЕЕ ДАВЛЕНИЕ, МПА; НОМИНАЛЬНОЕ	15 20	20 25
МАКСИМАЛЬНОЕ		
ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ, МИН^{-1} ; МИНИМАЛЬНАЯ	6 ПРИ РАСХОДЕ 4,2 Л/МИН 900 ПРИ РАСХОДЕ 630 Л/МИН	10 ПРИ РАСХОДЕ 1,8 Л/МИН 1000 ПРИ РАСХОДЕ 180 Л/МИН
МАКСИМАЛЬНАЯ		
МОМЕНТ НОМИНАЛЬНЫЙ, $\text{КН} \cdot \text{М}$	3,5	0,565
МОЩНОСТЬ НОМИНАЛЬНАЯ, КВТ	330	60

Принципиальным моментом в проектировании высокомоментных гидромоторов роликколопастного типа является расчет упругих деформаций статорной части мотора под действием давления рабочей жидкости в напорных полостях рабочего канала. Достаточно сложная конфигурация сечений статора и ротора не позволяет определить величину раскрытия зазоров на вершинах зубьев ротора методами сопротивления материалов. Упругая задача в рамках данной работы решена в конечно-элементной постановке.

Во время работы гидромотора жидкость высокого давления P_0 , подаваемая в гидромотор, заполняет необходимые объемы, ограниченные статором, роликами и ротором. Положение роликов и зубьев ротора изменяется во время

работы, тем самым изменяя объем, который заполняет жидкость высокого давления. Величина возникающего в результате упругой деформации радиального зазора δl определяет объем просочившейся в дренаж жидкости. Так как объем жидкости высокого давления, влияющего на упругую деформацию, постоянно изменяется, то необходимо рассмотреть возникающие ситуации в отдельности.



Рис. 2.4. Гидромотор ГМ180 со снятыми корпусом и статорным блоком

Рассмотрим изменение камеры высокого давления при вращении ротора гидромотора. В некоторый момент времени зуб ротора 1– (рис. 2.5) примет положение, которое характеризуется некоторым углом $\varphi = 55^0$. При этом жидкость высокого давления P_0 заполнит некоторые объемы, ограниченные роликом P1 и зубом ротора 1 (P1-1), а также между P3 и зубом 4 (P3-4). Данная ситуация повторится при повороте ротора на угол 60^0 (когда зуб 6 займет положение зуба 1, а зуб 3 – положение зуба 4).

В этой ситуации полости между зубьями 1-2, 2-3, 4-5 и 5-6 находятся под давлением слива, то есть разгруженными, поэтому давление в полостях P1-1 и P3-4 создает силы близкие к сосредоточенным. Более равномерные, но большие по величине, нагрузки на статор возникают при $\varphi = 74...84^0$ (рис. 2.6) и при

$\varphi = 115^\circ$ (рис. 2.7), когда под рабочим давлением находятся соответственно полости P2-4, P4-1 и P3-3, 3-4, P1-6, 1-6.

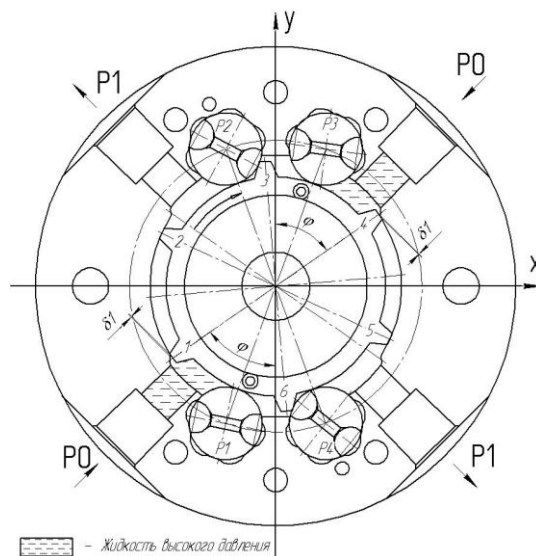


Рис. 2.5. К расчету зазора δ_1 между зубом ротора и рабочей поверхностью статора; угловая позиция ротора $\varphi < 55^\circ$

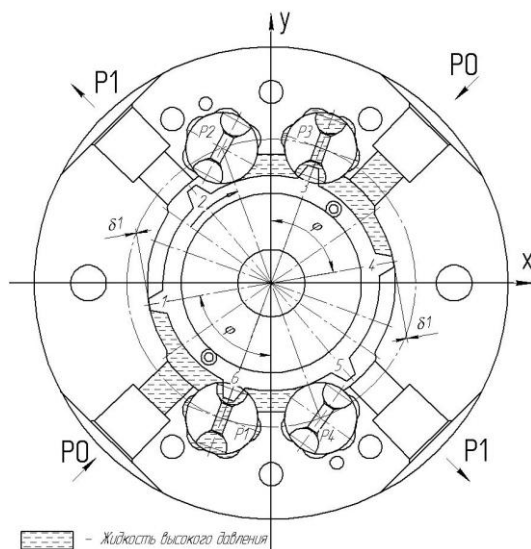


Рис. 2.6. Нагрузка на статор при φ в диапазоне от 74° до 84°

Таким образом, решения целесообразно выполнять при углах поворота ротора в диапазоне от 55° до 115° .

Для проведения расчетов методом конечных элементов были построены пространственные модели ротора и статора, описывающие реальную конструкцию указанных деталей гидромотора. Взаимное положение ротора и статора представлено на рис. 2.8.

Статор выполнен из легированного чугуна, ротор из стали 18ХГТ. Свойства этих материалов представлены в табл. 2.2. Материал деталей был задан как линейный упругий изотропный.

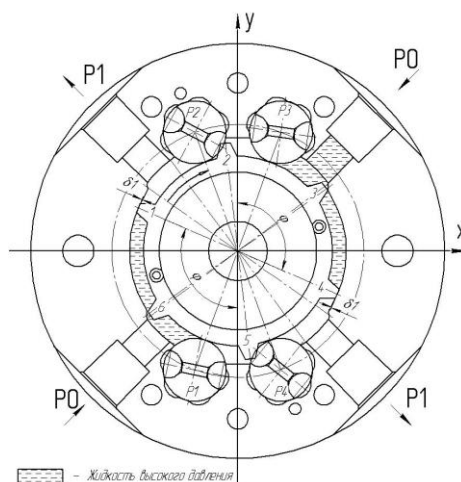


Рис. 2.7. Нагрузка на статор при $\varphi = 115^\circ$

Таблица 2.2

Свойства материалов для изготовления ротора и статора

СВОЙСТВО	ЗНАЧЕНИЕ	
	ДЛЯ РОТОРА	ДЛЯ СТАТОРА
МОДУЛЬ УПРУГОСТИ НОРМАЛЬНЫЙ, ПА	$2,12 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{11}$
МАССОВАЯ ПЛОТНОСТЬ, КГ/М ³	7800	7300
КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА	0,28	0,27
МОДУЛЬ УПРУГОСТИ НОРМАЛЬНЫЙ ПРИ СДВИГЕ КРУЧЕНИЕМ, ПА	$8,3 \cdot 10^{10}$	$8,6 \cdot 10^{10}$

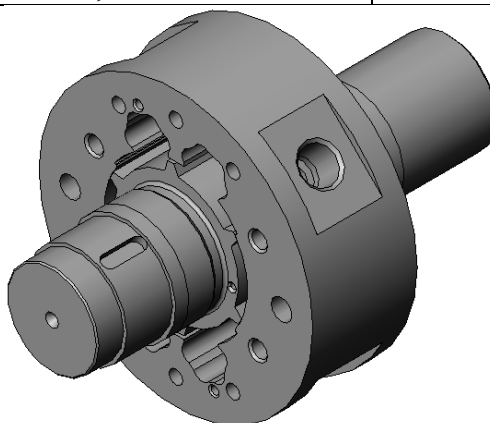


Рис. 2.8. Пространственная модель гидромотора

Для создания сетки были использованы объемные изопараметрические тетраэдры, которые содержат по 4 узла. Размер конечных элементов выбирался

итерационным способом. На каждом последующем шаге вычислений размер конечных элементов уменьшался вдвое. Изменения размера конечного элемента производилось до момента, когда размер не стал влиять на полученные результаты расчета.

Общий вид конечно-элементной модели показан на рис. 2.9. Для получения наиболее достоверных результатов расчета производился процесс искусственного сгущения сетки в наиболее ответственных местах расчета (зуб ротора). Сгущение сетки представлено на рис.2.10. После построения окончательной сетки число элементов достигло 268871.

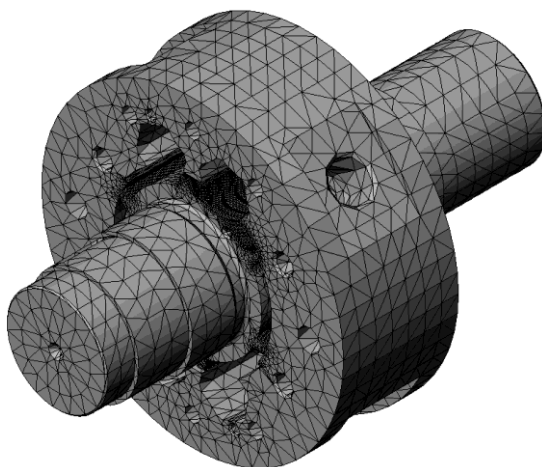


Рис. 2.9. Исходная сетка конечных элементов

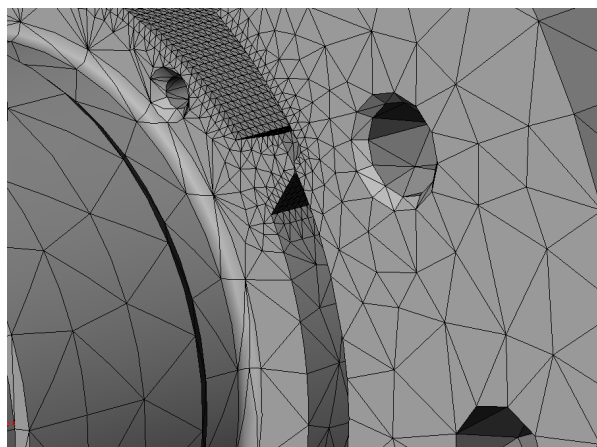


Рис. 2.10. Сгущение сетки в ответственных местах

В качестве ограничений при перемещении объектов в пространстве были заданы ограничения в перемещении отверстий под стяжные шпильки и призон-

ные болты. Такое ограничение вполне допустимо и не приводит к ошибочным результатам в процессе расчета.

Так как жидкость высокого давления заполняет в каждый момент времени некоторые объемы, ограниченные определенными поверхностями, то на эти поверхности были приложены нагрузки в виде распределенного усилия. В качестве максимально возможной нагрузки было принято давление $P_0 = 20$ МПа.

Расчет выполнялся для различных углов φ . В процессе расчетов устанавливалась величина зазора между зубом ротора и внутренней поверхностью статора. Эпюра распределений значений перемещений, возникающих в модели, изображена на рис. 2.11. На рис. 2.12 показана деформация зуба и деформация ротора в увеличенном виде. На данном рисунке – черным цветом показан первоначальный (исходный контур деталей), деформации представлены в масштабе 100:1. Полученные данные были занесены в табл. 2.3.

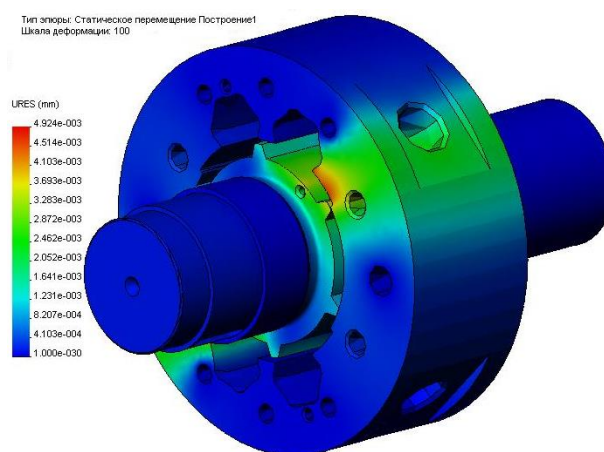


Рис. 2.11. Эпюра деформации (для угла $\varphi = 55^\circ$)

График зависимости величины зазора от угла поворота ротора представлен на рис. 2.13.

Проведенный количественный анализ влияния давления рабочей жидкости в полости статора гидромотора и угла поворота ротора на величины раскрытия зазора между вершинами зуба ротора и рабочей поверхностью статора показал, что даже при максимальном давлении 20 МПа во всем конструктивно определенном диапазоне изменения угла поворота ротора зазор остается в пределах поля допуска, принимаемого в качестве нормативного при проектирова-

нии промышленных гидравлических машин. Это свидетельствует о том, что дренаж не превышает допустимого объема, и механические характеристики привода соответствуют проектным.

Таблица 2.3

Значение угла φ , град	Величина зазора δl , мм
55	0,0044
65	0,0047
75	0,0053
85	0,0057
95	0,0061
110	0,0070
115	0,0068

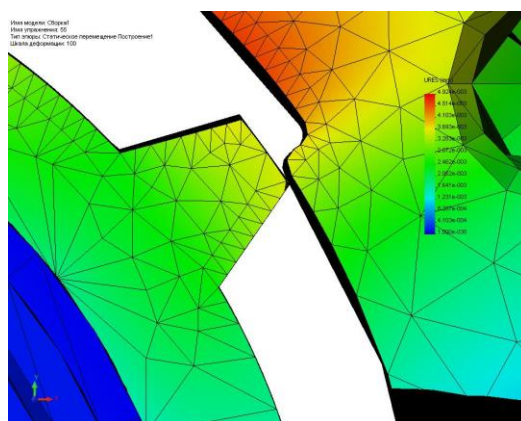


Рис. 2.12. Эпюра деформации (для угла $\varphi = 55^\circ$, масштаб 100:1)

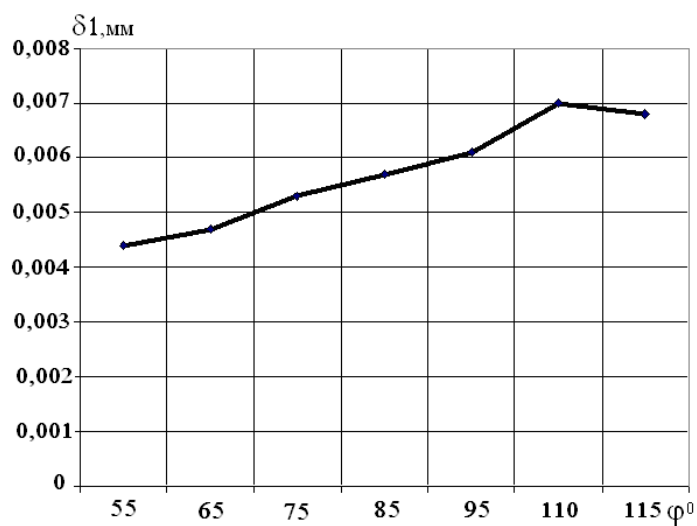


Рис. 2.13. График зависимости величины зазора от угла поворота ротора

2.3. Конструктивные особенности прокатных клетей и станов для прокатки прутков и труб

Оснащение сортопрокатных многовалковых клетей индивидуальным гидроприводом от моторов роликколопастного типа решает проблемы устранения трансмиссий и редукторов, а также рассогласования скоростей из-за наличия зазоров, но не упрощает процедуру регулирования размеров калибров. Если калибры сформированы цилиндрическими валками, то изменение размеров калибра требует параллельного смещения осей валков и, следовательно, существенного усложнения конструкции. Даже безредукторный привод четырех валков не позволяет реализовать двухопорную схему установки валков. Валки грибовидные консольные в любом случае понижают жесткость клетки и точность прокатки.

Перечисленные и решенные применением индивидуального гидропривода проблемы прокатки в многовалковых калибрах успешно решаются установкой грибовидных валков с конической бочкой. В этом случае квадратный калибр формируется коническими поверхностями, а круглый – также нарезается на конических валках предварительно сведенных с образованием квадратного просвета. Схемы замыкания четырех валков при формировании квадратного и круглого калибров показаны на рис. 2.14. Все валки установлены консольно в индивидуальных подушках и могут смещаться в осевом направлении (рис. 2.14, *а*), изменяя размеры квадратного калибра, который при этом остается замкнутым. Раскрытие торцевых зазоров в этом случае определяется лишь упругой деформацией подушек и корпуса клетки. Нарезка круглого четырехвалкового калибра после сборки клетки осуществляется с помощью фрезерной установки, аналогичной описанной в работе [36], как это показано на рис. 2.15. Несомненным достоинством калибров, образованных бочками конических валков, является уменьшение поперечной составляющей полного давления металла на валки.

При прокатке, кроме поперечной, возникает продольная составляющая, равная $P/\sqrt{2}$, где P – сила полного давления металла на валок, и дополнительный изгибающий момент от силы параллельной оси валка.

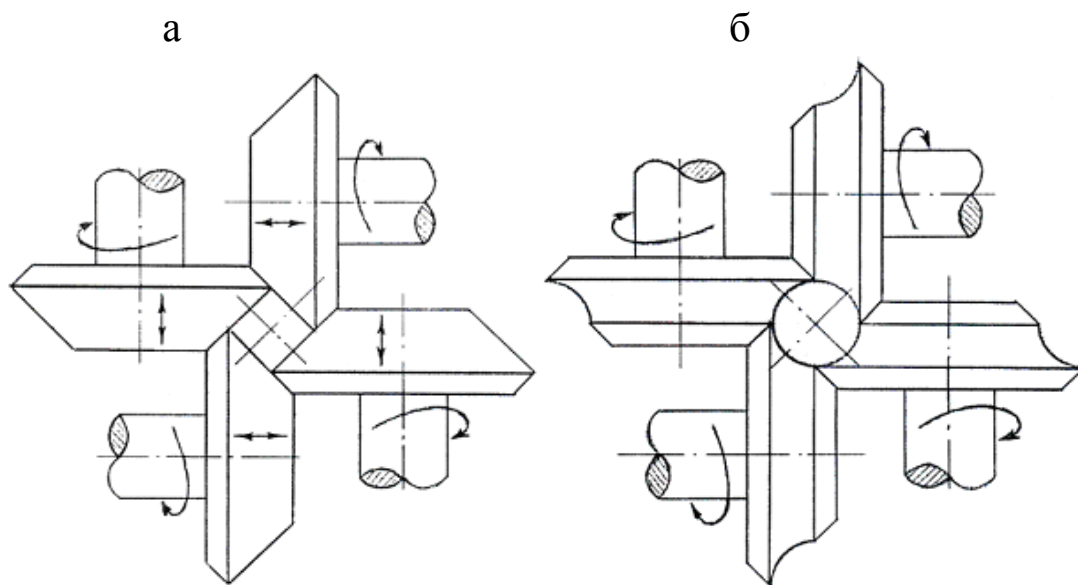


Рис. 2.14. Схемы формирования калибров коническими валками

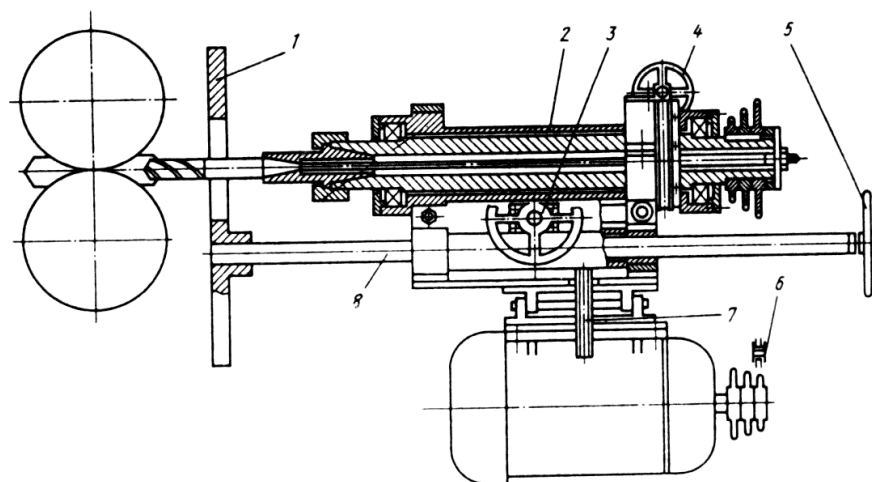


Рис. 2.15. Устройство для расточки круглого четырехвалкового калибра:

- 1 – узел крепления устройства к клет; 2 – корпус; 3 – механизм поперечного перемещения; 4 – механизм вертикального перемещения; 5 – механизм осевого перемещения; 6 – привод; 7 – цепная передача; 8 – направляющая

Эти дополнительные воздействия воспринимаются упорными подшипниками валкового узла. При рациональном конструировании подушек удастся несколько поднять жесткость клетки в сравнении с аналогичными клетями, в которых многовалковый калибр образован цилиндрическими валками.

Применение калибров, выполненных на конических бочках и образованных гладкими коническими бочками, известно сравнительно давно, что отражено в аналитическом обзоре настоящей работы.

Все выявленные недостатки известных конструкций клетей с многовалковыми калибрами, образованными коническими валками в соответствии со схемой их сопряжения, показанной на рис. 2.14, решаются в клетях с индивидуальным гидроприводом валков, конструктивная схема которой приведена на рис. 2.16.

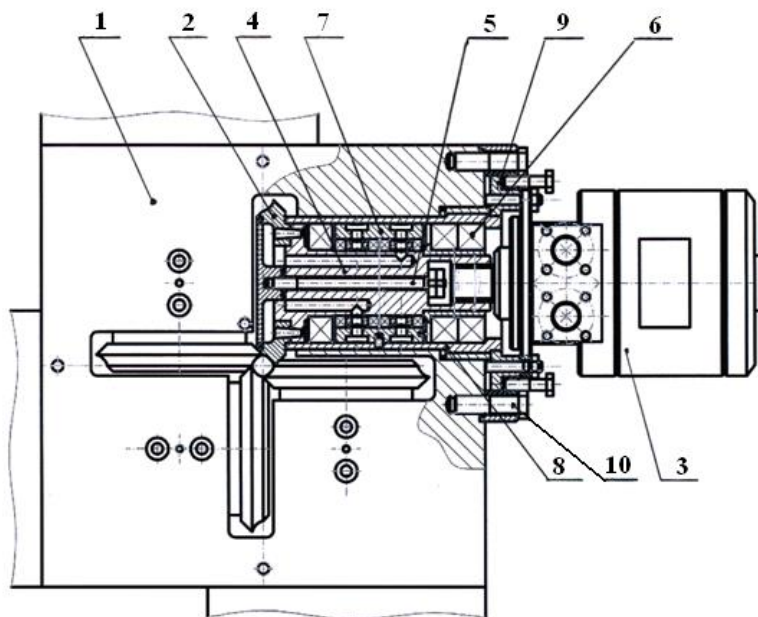


Рис. 2.16. Конструкция четырехвалковой клетки с индивидуальным гидроприводом валков:

- 1–корпус клетки; 2–валок; 3–гидромотор; 4–ось валка; 5–стяжная шпилька;
6–подшипник; 7–смазочный коллектор; 8–гильза валкового узла;
9–установочный фланец; 10–регулирующий болт

Корпус клетки 1 выполнен монолитным с пазами для установки четырех консольных конических валков 2 и с четырьмя боковыми расточками для помещения валкового узла с гидромоторами 3. Валки закрепляются на оси 4 с помощью штифтов и осевой стяжной шпильки 5. Подшипники 6 и смазочный коллектор 7 помещены в гильзу 8, установленную с возможностью осевого перемещения в расточке корпуса. На выходной стороне валкового узла ось 4 посредством шлицевого соединения сопрягается с валом гидромотора 3. Последний жестко закреплен на фланце 9, который притягивается болтами 10 к корпусу 1, смещая в осевом направлении как гильзу 8 вместе с валком 2, так и гидро-

мотор 3. На конической части валков 2 после сборки клетки фрезой может нарезаться предписанный калибровкой круглый калибр. Поскольку в круглом калибре обжимных сортопрокатных клеток может предусматриваться регламентированный эксцентриситет радиальной поверхности калибра, гильзы 8 являются эксцентричными и позволяют при их повороте специальным механизмом (на схеме не показан) в расточках корпуса осуществлять радиальное смещение валкового узла. После расточки калибра обратным разворотом гильз 8 устанавливается требуемый раствор валков. Использование эксцентриковых гильз позволяет также обеспечивать замыкание квадратного и круглого калибров после переточки валков, то есть при уменьшении их диаметров.

Рабочие валки клетки не имеют механической связи, а их скоростное согласование достигается за счет многопоточных делителей и сумматоров потоков рабочей жидкости [132, 133, 137].

Клетки помещаются осевыми цапфами в расточки станины стана с возможностью осевого разворота и фиксации в произвольном угловом положении, что особенно важно в случае использования конических валков, порождающих скручивание прокатываемой полосы при прокатке.

Повышенная жесткость клетки обеспечивается цельным корпусом, эксцентриковой системой радиальной регулировки калибра и применением конических валков. Вектор полного давления металла на валок направлен под углом 45^0 к оси валка, поэтому лишь часть нагрузки воздействует на ось валка в поперечном направлении.

Перевалка редукционного стана осуществляется клетями без особых затруднений, поскольку быстросъемные гидромуфты [137] являются серийно выпускаемыми изделиями вполне надежными в эксплуатации. Смена валков в клетях производится после демонтажа гидромотора и стяжной шпильки. С помощью фланца 9 гильза 8 вытягивается из корпуса 1, освобождая валок 2, который извлекается из продольного паза.

Возможна установка корпусов клеток вплотную друг другу с установлением минимального межклетевого расстояния.

Разработаны также варианты конструктивного исполнения гидроуправляемых двухвалковых сортопрокатных и редукционных клетей, где применена двухопорная схема установки валков в эксцентриковых подушках. Каждый валок приводится в движение от двух гидромоторов. Двухопорная установка валков и цельный стальной корпус клетки обеспечивают высокую жесткость. По этому показателю клетки превосходят все известные. Они с успехом могут использоваться при теплой и даже холодной прокатке. Одна из таких клеток промышленного исполнения, установленная на площадке ОАО «Гамма ЛТД» (Белоярский р-н Свердловской обл.), показана на рис. 2.17.

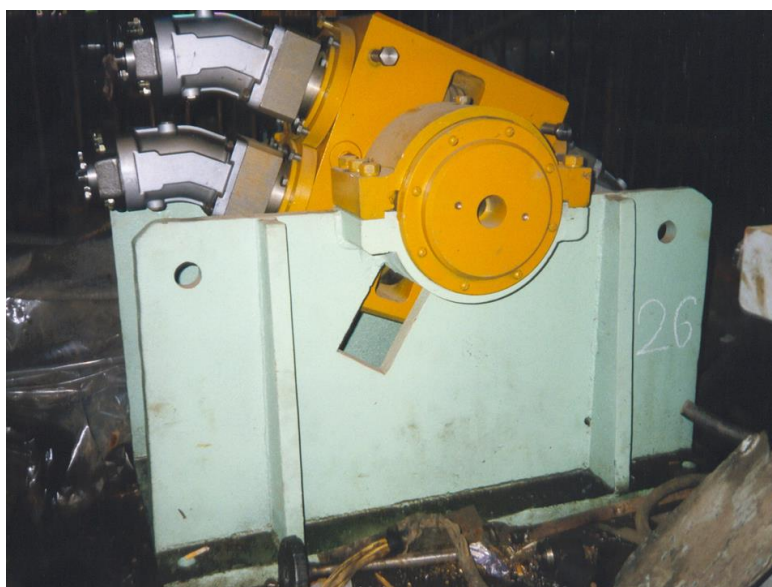


Рис. 2.17. Промышленная двухвалковая сортопрокатная клеть с индивидуальным гидроприводом валков

Клеть оснащена серийными аксиально-плунжерными гидромоторами с установкой по два мотора на каждый валок. Диаметр валков 200 мм, мощность привода 120 кВт, диапазон регулирования скорости прокатки от 0,05 до 10 м/с. Корпус клетки (стальной цельный) выполнен с возможностью осевого разворота на произвольный угол в цапфах станины. Последние одновременно выполняют роль коллекторов гидромоторов. Согласование скоростей валков гидравлическое посредством делителей потока. Скоростью управляют с помощью серийного регулятора расхода.

При сборке прокатных блоков или при размещении клетей в группе проявляется еще одно существенное достоинство индивидуального гидропривода валков – отсутствие опрокидывающего момента, прикладываемого к клетям со стороны традиционного электромеханического привода. Это значительно упрощает конструктивное исполнение элементов крепления клетей и снижает металлоемкость блоков и групп клетей.

В блоке или группе могут использоваться конструктивно идентичные клетки как сортовой, так и редуцированной прокатки. При использовании гидравлической самонастройки гидромоторов (переключения напорной линии с делителей потока на параллельное питание моторов) необходимость установки между клетями проводковых устройств и даже летучих ножниц на выходной стороне блока отпадает.

Важным проектным мероприятием при создании блоков и групп гидроприводных клетей всегда является рациональный или оптимальный выбор параметров моторов, в частности роliko-лопастного типа. Насосная станция, от которой питаются гидромоторы жидкостью высокого давления, характеризуется максимальными давлением и расходом. Их произведение, деленное на КПД всей гидросистемы, определяет установленную мощность электропитания насосной станции или долю полной мощности, приходящуюся на рассматриваемый блок. Любая непрерывная группа сортовых или редуцированных клетей работает с последовательным ростом скорости прокатки и снижением на маршруте крутящих моментов. Расход рабочей жидкости в гидромоторе определяет скорость, давление – момент прокатки.

В качестве примера организации процедуры рационального выбора параметров гидромоторов рассматриваются варианты укомплектования клетей моторами в группе, спроектированной для установки на литейно-ковочном-прокатном агрегате, предназначенном для прокатки катанки из среднеуглеродистой стали. Исходная заготовка шестигранного поперечного сечения с диаметром вписанной окружности 35 мм, полученная проходной радиальной ковкой или прессованием, прокатывается по схеме круг–квадрат–круг в четырех-

валковых калибрах конических валков до катанки диаметром 6,5 мм. Материал заготовки Сталь 45 (ГОСТ1050-98). Для разработки маршрута прокатки и размеров калибров использованы опытные данные, а расчет кинематических и энерго-силовых параметров выполнен по опубликованным [36, 77, 139, 140] методикам, разработанными для случаев прокатки в многовалковых и двухвалковых калибрах цилиндрических валков. Катающий диаметр определяется как при двухвалковой прокатке простых сортовых профилей [139]. Форма контактной поверхности на каждом валке треугольным (при прокатке по схеме квадрат–круг) и параболическим (при прокатке по схеме круг–квадрат и шестиугольник–квадрат) контурами. Скручивание полосы не учитывалось. Сопротивление металла деформации рассчитывалось методом термомеханических коэффициентов по данным работы [141].

Опыты по прокатке свинцовых и стальных образцов были проведены на кафедре обработки металлов давлением УГТУ–УПИ. Экспериментальное исследование формоизменения металла при прокатке в четырехвалковом калибре проводилось на лабораторной установке (две четырехвалковые компактные клетки) с приводом от токарного станка. Прокатка проводилась по схеме круг–квадрат. В результате эксперимента было выявлено, что средняя вытяжка при прокатке по схеме круг-квадрат составляет 1,55, а при прокатке по схеме квадрат–круг – 1,29, максимальная вытяжка $\lambda_{\max 1} = 1,6$ и $\lambda_{\max 2} = 1,3$ соответственно. Дальнейшее увеличение обжатия при прокатке приводит к переполнению калибра. Кроме того, были выведены экспериментальные зависимости параметров формоизменения (коэффициента вытяжки, степени заполнения калибра и др.) от коэффициента обжатия и относительного диаметра валков.

Опираясь на полученные данные по прокатке образцов в четырехвалковом калибре, была разработана схема обжатий для получения катанки диаметром 6,5 мм из шестигранной заготовки с размером по диагонали 35 мм.

Вытяжки приняты средние: при прокатке по схеме круг–квадрат 1,55, при прокатке по схеме квадрат–круг 1,29, для всех клеток за исключением калибровочной (в

11-й клетки принято $\lambda_{11} = 1,06$), в которой необходимо получить катанку высокой точности. Выбранная схема обжатий приведена на рис. 2.18,

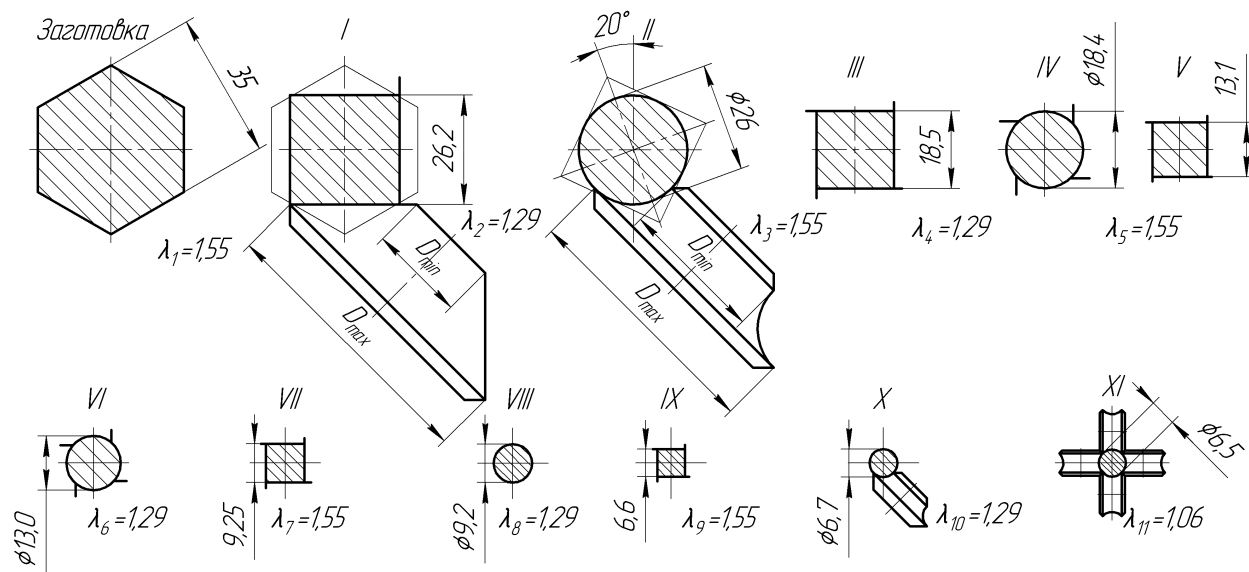


Рис. 2.18. Схема калибровки для прокатки катанки в четырехвалковых калибрах конических валков

а результаты расчета геометрических, кинематических параметров и контактных давлений – в табл. 2.4. При определении момента прокатки коэффициент плеча приложения равнодействующей полного давления металла на валки рассматривалась относительная координата центра тяжести эпюры контактных давлений. Прокатка по представленной калибровке характеризуется энергосиловыми параметрами, приведенными в табл. 2.5.

Гидравлический привод валков рабочих клеток прокатного блока осуществляется от гидромоторов, конструкция которых описана в п. 2.1. Привод валков индивидуальный. Критерием выбора оптимальных конструктивных параметров гидропривода, в данном случае, будет являться минимальный расход рабочей жидкости гидропривода для обеспечения необходимого момента прокатки (см. табл. 2.5) при максимальном давлении в гидросистеме $P = 20$ МПа. Возможны несколько вариантов установки гидромоторов различных модификаций. Рассмотрим эти варианты.

Результаты расчета калибровки валков при прокатке катанки диаметром 6,5 мм

№ клетки	Калибр	λ_i	$\omega_i \cdot 10^{-6}$ м/с	v_i , м/с	$D_{\min} \cdot 10^{-3}$ м	$D_{\max} \cdot 10^{-3}$ м	$D_{ki} \cdot 10^{-3}$ м	n_i , об/мин	(d_i) $c_i \cdot 10^{-3}$, м	$l_{ci} \cdot 10^{-3}$, м	$H_{cpi} \cdot 10^{-3}$, м	$\frac{l_{ci}}{H_{cpi}}$	ε_i	$\tau_{\partial i}$, с	u_i , с ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
-	заготовка		1061	0,16	-	-	-	-	36,8	-	-	-	-	-	-
1	квадр.	1,55	685	0,248	213	250	232,0	20,4	26,2	35,0	31,5	1,1	0,44	0,172	2,56
2	круг	1,29	531	0,320	24	250	237,0	25,8	26,0	36,2	26,1	1,4	0,25	0,127	2,00
3	квадр.	1,55	543	0,496	224	250	237,0	40,0	18,5	29,8	22,25	1,3	0,44	0,073	6,00
4	круг	1,29	265	0,640	232	250	241,0	50,7	18,4	30,6	18,45	1,7	0,25	0,054	4,63
5	квадр.	1,55	171	0,992	181	200	191,0	99,19	13,1	22,5	15,75	1,4	0,44	0,028	15,71
6	круг	1,29	133	1,280	187	200	193,5	126,3	13,0	23,1	13,05	1,8	0,25	0,020	12,52
7	квадр.	1,55	87	1,984	187	200	193,5	195,8	9,25	19,0	11,13	1,7	0,44	0,012	36,67
8	круг	1,29	66,4	2,560	191	200	195,0	250,7	9,2	19,5	9,23	2,1	0,25	0,009	27,78
9	квадр.	1,55	42,8	3,968	141	150	145,5	520,8	6,6	13,7	7,9	1,7	0,44	0,004	104,76
10	круг	1,214	35,2	4,817	143	150	146,5	628,0	6,7	13,9	6,65	2,1	0,19	0,003	59,38
11	круг	1,06	33,2	5,106	112	120	116,0	840,7	6,5	13,2	6,6	2,0	0,058	0,002	21,80

Окончание табл. 2.4

№ клетки	$\Pi_i \cdot 10^{-3}$, м	τ_i , с	Δt_i , °C	t_i , °C	k_ε	k_u	k_t	σ_i , МПа	$n\sigma_i$	P_{cpi} , МПа	n_{cpi}	$\sigma_{\tau i}^*$, МПа	$P_{cpk,i}$, МПа	$F_{ki} \cdot 10^{-6}$ м ²	P_i , кН
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	104,8	1,21	-1,94	1050	1,32	0,82	0,85	79,4	1,18	107,75	1,41	91,31	114,49	720,21	82,457
2	81,7	0,94	0,20	1051,4	1,30	0,80	0,86	77,19	1,23	109,48	1,57	88,77	121,31	332,76	40,368
3	74,0	0,61	-3,41	1051,3	1,32	0,93	0,84	85,81	1,22	120,39	1,41	98,68	129,38	432,99	56,022
4	57,8	0,47	-1,146	1054,7	1,30	0,89	0,83	82,87	1,28	122,30	1,57	95,30	137,71	199,06	27,413
5	52,4	0,30	-5,02	1055,9	1,32	1,00	0,82	93,41	1,23	132,49	1,41	107,42	142,87	231,50	33,074
6	40,8	0,23	-5,06	1060,9	1,30	0,97	0,80	87,06	1,30	130,15	1,57	100,12	147,25	106,17	15,634
7	37,0	0,15	-6,6	1065,9	1,32	1,16	0,79	104,39	1,28	154,06	1,41	120,05	168,15	138,03	23,210
8	28,9	0,12	-3,02	1072,5	1,30	1,10	0,78	96,26	1,35	149,44	1,57	110,70	171,55	63,43	10,881
9	26,4	0,08	-8,99	1075,5	1,32	1,48	0,77	129,82	1,28	191,59	1,41	149,29	209,11	71,02	14,850
10	21,1	0,0062	-2,47	1084,5	1,20	1,29	0,75	100,19	1,35	155,54	1,57	115,22	178,72	32,93	5,885
11	20,4	0,059	-2,5	1087,0	0,9	1,15	0,74	66,10	1,23	93,75	1,57	76,02	103,88	30,33	3,151

Таблица 2.5

Энергосиловые параметры прокатки

Параметр	№ клетки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
n_i , об/мин	20,4	25,8	40,0	50,0	99,19	126,3	195,8	250,7	520,8	628,0	840,7
M_i , кНм	1,154	0,487	0,668	0,279	0,298	0,1203	0,1764	0,071	0,0813	0,0273	0,0139
$N_{двi}$, кВт	2,42	1,29	2,74	1,46	3,03	1,56	3,55	1,82	4,35	1,76	1,20
$N_{кли}$, кВт	9,68	5,16	10,96	5,84	12,12	6,24	14,20	7,28	17,40	7,04	4,80
N_i , кВт	16,13	8,60	18,30	9,73	16,16	8,33	18,93	9,70	20,47	8,28	5,56

I вариант. На каждую клетку прокатного блока устанавливается своя модификация гидромотора в зависимости от необходимого момента прокатки. Принципиальная конструкция гидромотора приведена на рис. 2.19. Давление в гидросистеме постоянно $P=20,0$ МПа. Диаметр внутреннего кольца (ротора) $D_{вн} = 70$ мм. В зависимости от момента прокатки M_i изменяется наружный диаметр рабочего канала ($D_{нар}$) и длина поршня (L). Для описанной выше конструкции клеток прокатного блока выполняется условие

$$M_{pi} = M_i, \quad (2.1)$$

где M_{pi} – крутящий момент, создаваемый ротором гидромотора; M_i – крутящий момент прокатки.

Для определения M_{pi} рассчитывается площадь рабочей поверхности поршня (см. рис. 2.19)

$$S_i = 0,5 (D_{наpi} - D_{вн}) L_i.$$

Сила, действующая со стороны рабочей жидкости на рабочую поверхность поршня, определяется по формуле

$$F_i = P S_i = P 0,5 (D_{наpi} - D_{вн}) L_i.$$

Тогда крутящий момент ротора с двумя поршнями будет определяться по формуле

$$M_{pi} = 0,25 P L_i (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2).$$

Подставив полученную формулу для M_{pi} в соотношение (2.1), получим

$$M_i = 0,25 P L_i (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2).$$

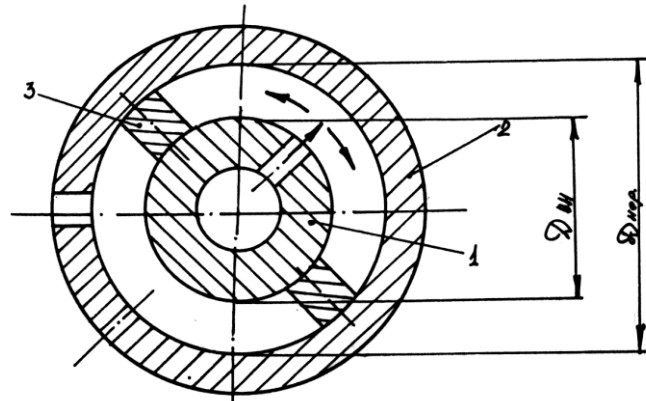


Рис. 2.19. Расчетная схема гидромотора: 1 – ротор; 2 – статор; 3 – поршень

Отсюда

$$D_{\text{нари}} = \sqrt{\frac{M_i}{0,25 P L_i} + D_{\text{вн}}^2}; P = \frac{M_i}{0,25 L_i (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2)}; L_i = \frac{M_i}{0,25 P (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2)}. \quad (2.2)$$

Для определения расхода подаваемой в гидросистему жидкости определяется объем рабочего канала (см. рис.2.19)

$$V_i = 0,25 \pi L_i (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2).$$

Тогда расход жидкости будет определяться по формуле

$$Q_i = 0,25 \pi L_i (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2) n_i, \quad (2.3)$$

где n_i – частота вращения ротора гидромотора (исходя из принятой конструкции привода, частота вращения ротора гидромотора равна частоте вращения валков).

Введены следующие ограничения на размеры поршня и рабочего канала гидромотора:

$$\begin{aligned}
10 \leq L_i &\leq 200 \text{ мм}; \\
5 \leq \frac{D_{\text{нар}i} - D_{\text{вн}}}{2} &\leq 25 \text{ мм}; \\
50 \leq D_{\text{вн}} &\leq 300 \text{ мм}.
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

Расчет по данной методике выполнен для всех клеток и его результаты сведены в табл. 2.6, из анализа которой следует, что расход жидкости по всему блоку составит $Q_I = 152,2$ л/мин. Следует отметить, что данный вариант сопряжен с необходимостью установки 11 модификаций гидромоторов, что требует дополнительного штата запасных двигателей всех модификаций, что в свою очередь связано с большими материальными затратами. Кроме того, нет возможности быстрой замены вышедшего из строя двигателя взаимно-заменяемым. В расчетах для клеток с 5-й по 11-ю не выполняется ограничение (2.4), что может привести к быстрому выходу из строя рабочих частей двигателя вследствие ускоренного разогрева и износа.

Таблица 2.6

Результаты расчетов конструктивных параметров гидромоторов по первому варианту

Параметр	№ клетки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$D_{\text{нар}i} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	88	80	80	80	78	78	78	76	76	72	72
$L_i \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	80	64,0	80	36,8	49,6	20	29,4	16	18,3	19,0	10,0
$S_i \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2$	7,2	3,2	4,4	1,84	1,99	0,80	1,18	0,48	0,55	0,19	0,10
$F_i \cdot 10^{-3}, \text{ Н}$	14,6	6,49	8,91	3,73	4,02	1,63	2,38	0,97	1,114	0,39	0,203
$V_i \cdot 10^{-4}, \text{ м}^3$	1,79	0,75	1,04	0,434	0,46	0,19	0,27	0,11	0,126	0,04	0,022
$Q_i, \text{ л/мин}$	3,65	1,35	4,15	2,198	4,58	2,36	5,37	2,75	6,57	2,66	1,863

2 вариант. На все клетки блока устанавливается одна модификация гидромотора. Давление рабочей жидкости в гидросистеме варьируется. Данная модификация двигателя должна обеспечить работу наиболее загруженной по моменту клетки блока. Такой клетью является первая клеть с $M_1 = 1154 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

$$D_{\text{нар}} = 88 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad L = 80 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad S = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad F_1 = 14,587 \text{ кН};$$

$V = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; $Q = 3,65 \text{ л/мин}$. Результаты расчета расхода рабочей жидкости во всех клетях блока приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Результаты расчетов по второму варианту

Параметр	№ клетки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P_i , МПа	20	8,45	11,59	4,85	5,170	2,02	3,06	1,23	1,41	0,47	0,24
$F_i \cdot 10^{-3}$, Н	14,6	6,17	8,46	3,54	3,768	1,52	2,23	0,89	1,03	0,34	0,18
Q_i , л/мин	3,65	4,62	7,16	9,08	17,76	26,61	35,0	44,90	93,2	112,4	150

Суммарный расход жидкости на один гидромотор по всем клетям по этому варианту составляет $\sum_{i=1}^{11} Q_i = 501 \text{ л/мин}$, а по всему блоку (на четыре мотора для каждой клетки) $Q_{II} = 2004 \text{ л/мин}$.

Таким образом, сопоставляя данный вариант с первым видно, что здесь очень большой расход рабочей жидкости. Однако по данному варианту требуется меньший штат запасных двигателей, так как все двигатели взаимозаменяемы (одна модификация), следовательно, данный вариант наиболее экономичен по металлоемкости, но вынуждает использовать насосную станцию большой установленной мощности.

Проанализированы варианты установки на клетки блока моторов двух модификаций. При этом в качестве наиболее нагруженных по моменту выбраны 1-я и 5-я клетки; 1-я и 7-я клетки; 1-я и 9-я клетки. Результаты расчета расходов по всем пяти вариантам комплектации клеток гидромоторами сведены в табл. 2.8. Расход жидкости не зависит от изменения объема рабочего канала двигателя (изменения $D_{\text{нари}}$ и L_i). В частности, подставив выражение (2.2) в формулу (2.3) получим зависимость:

$$Q_i = 0,25 \pi \frac{M_i}{0,25 P_i (D_{\text{нари}}^2 - D_{\text{вн}}^2)} = \pi \frac{M_i n_i}{P_i}.$$

Таблица 2.8

Результаты расчета рабочей жидкости на прокатный блок для рассмотренных пяти вариантов модификаций гидромоторов

Модификация по клетям	№ варианта				
	1	2	3	4	5
	1 – 11	по 1	1; 5	1; 7	1; 9
$\sum_{j=1}^V Q_j$, л/мин	152,2	2004,0	568,0	450,0	512,8

Следовательно, изменение расхода жидкости связано лишь с изменением давления рабочей жидкости в системе для данной клетки (при условии, что M_i и n_i фиксированы). В свою очередь изменение давления жидкости пропорционально связано с изменением $D_{нарi}$ и L_i , а верхняя величина давления имеет верхний предел 20,0 МПа. Значит наименьший расход жидкости будет в том случае, если обеспечить давление $P_i=20,0$ МПа на всех клетях, что было реализовано в 1-м варианте. Однако, как говорилось выше, размеры рабочего канала в этом случае не удовлетворяют принятым ограничениям (2.4)

Для выбора рационального варианта расположения двигателей различных модификаций необходимо рассмотреть и экономические показатели по каждому из вариантов. Но так как данный технологический процесс (использование гидродвигателей для прокатки) мало изучен и применяется впервые, то учесть все материальные затраты на проектирование установок с различными модификациями двигателей затруднительно, а аналогов подобного процесса просто не существует. Поэтому можно говорить лишь о качественном выборе оптимального варианта двигателей. Так, сравнивая первые два варианта можно заметить, что они являются граничными: наименьший расход и все одиннадцать модификаций двигателей в первом варианте, и наибольший расход, но одна модификация двигателей во втором. Можно предположить, что первый вариант экономически малоэффективен из-за необходимости иметь большой парк гидромоторов всех модификаций, причем не взаимозаменяемых между собой; вто-

рой вариант напротив, позволяет иметь в штате лишь одну модификацию двигателя с параметрами 1-ой клетки, но связан с большим расходом рабочей жидкости, а значит потребуются установка насосных станций избыточной мощности, что скажется на увеличении себестоимости продукции. Учитывая эти недостатки, целесообразно остановиться на среднем варианте по расходу и установке двигателей различных модификаций.

2.4. Простейший вариант автоматического согласования скоростного режима прессования и непрерывной прокатки

Если будущее производства труб из коррозионно-стойких сталей за технологией прямого совмещения прессования с редукионно-растяжной прокаткой, то внедрение такой технологии затруднено отсутствием компактных и эффективно управляемых редукионных станков и нерешенной проблемой скоростного согласования приводов горизонтальных гидравлических прессов и клеток прокатного стана.

Известно, что скорость истечения прессизделия при использовании гидравлического привода не остается постоянной в течение цикла прессования и зависит от силы прессования и, следовательно, от давления рабочей жидкости в главном цилиндре пресса. На силу прессования оказывают влияние многочисленные технологические факторы, стабилизация которых либо трудна, либо невозможна.

Если прессуемая труба после выхода из матрицы сразу направляется в клетки редукионного стана, то скорость истечения металла должна быть равна скорости входа трубы в первую клетку стана. Чрезмерное натяжение трубы при завышенной скорости вращения валков приводит или к пластической деформации и даже к обрыву трубы, или к пробуксовке трубы в валках, что провоцирует налипание металла на рабочие поверхности калибров и ухудшение качества поверхности горячекатаных труб.

По условиям прокатки на непрерывном стане необходимо поддержание заданного режима межклетевых натяжений полосы. Следовательно, клетки стана настраиваются не только в соответствии с проектируемым режимом вытяжек, но и с заданными натяжениями между клетями.

Механическая характеристика гидропривода может рассматриваться как идеально жесткая, если не учитывать сжимаемость рабочей жидкости. Это обстоятельство важно при разработке системы автоматизации привода клетки, поскольку позволяет не рассматривать работу системы в переходные периоды, в частности при входе горячепрессованной трубы в валки стана, когда крутящий момент на валах гидромоторов скачкообразно изменяется от момента холостого хода до момента прокатки.

Регулирование скорости вращения ротора гидромотора осуществляется простыми техническими средствами – дросселями или регуляторами расхода, в отличие от систем тиристорного или частотного управления электромеханическим приводом. В данной разработке для привода четырехвалковой редуционной клетки используются четыре механически не связанных гидромотора M_{ij} , например, роликколопастного типа, в напорных линиях которых установлен четырехпоточный делитель $ДП_i$, а в общей сливной магистрали всех моторов помещен регулятор расхода $РР$, как это показано на гидросхеме привода редуционного стана (рис. 2.20).

На выходе каждого делителя потока $ДП_i$ установлен управляемый дроссель $Д_i$, механически связанный с электрическим шаговым двигателем $ШД_i$. Регулировочный винт дросселя регулятора расхода $РР$ соединен с валом $ШД_0$. Определенная установка этого дросселя стабилизирует общий расход рабочей жидкости в приводе редуционного стана.

Все гидромоторы стана питаются жидкостью высокого давления либо от индивидуальной насосной станции, в состав которой входят: насос $Н$, фильтр сливной линии $Ф$, холодильник $Х$, бак $Б$ и предохранительный клапан $КП$, либо от насосно-аккумуляторной станции гидравлического пресса.

Подача рабочей жидкости в напорную магистраль стана и слив в бак осуществляются гидрораспределителем ГР с электромагнитным управлением (ЭМ1 и ЭМ2). В сливной магистрали между ГР и РР установлен расходомер РМ2, формирующий аналоговый или цифровой сигнал, пропорциональный реальному суммарному расходу рабочей жидкости (с учетом переменных во времени дренажных потерь расхода).

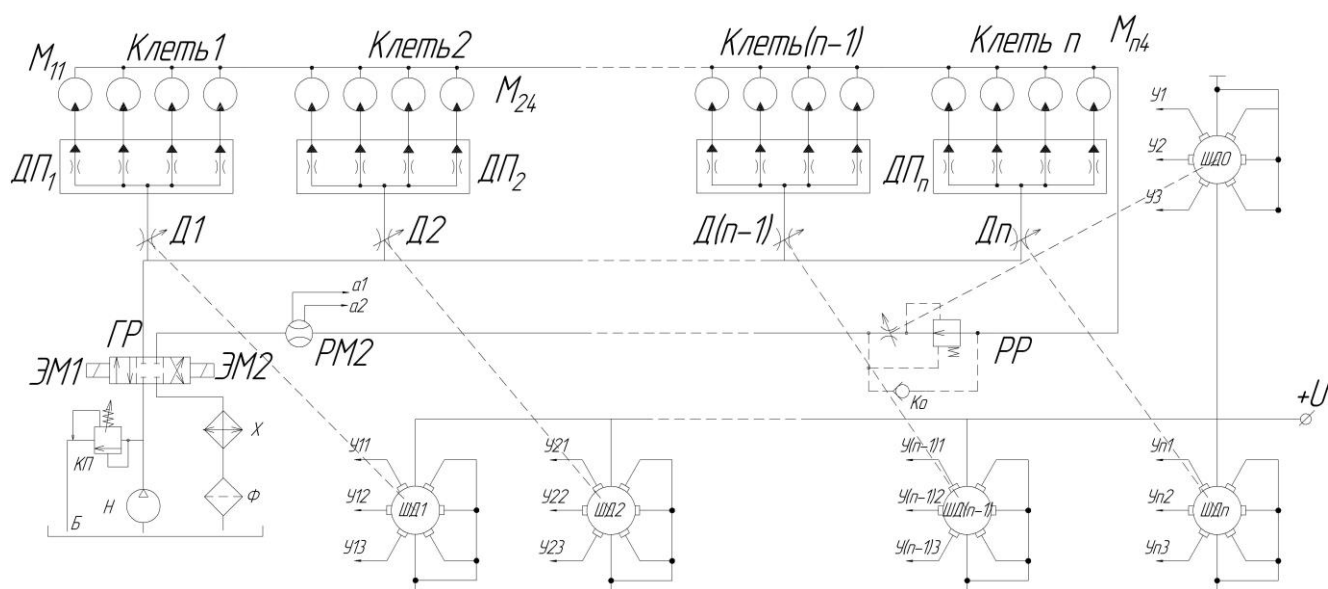


Рис. 2.20. Схема гидравлическая редукционно-растяжного стана

В случае использования цеховой НАС напорная и сливные линии подключаются на соответствующие входы гидрораспределителя ГР. Поскольку моторы роликопастного типа имеют конструкцию, предусматривающую возможность реверса, то в гидросхеме на рис. 2.20 предусмотрена установка трехпозиционного ГР, дающего возможность изменять направление вращения валков всех клеток в случае вывода оборудования из аварийного состояния (например, бурение трубы в одной из клеток). При реверсировании стана делители потоков ДП_і работают в режиме суммирования; скорость обратного вращения каждой клетки определена актуальной настройкой дросселей Д1; регулятор расхода РР шунтируется обратным клапаном КО. Реверс осуществляется подачей электропитания на обмотки ЭМ2.

Управление приводами редукционного стана в согласованном с гидравлическим прессом режиме строится по трехэтапной схеме. На первом этапе еще

до начала истечения трубы из матрицы, но после начала движения плунжера главного цилиндра, на основе предварительной информации о скорости прессования, поступающей с расходомера РМ1 (рис. 2.21), осуществляется разгон всех клеток стана в соответствии с установками по скоростям, отображающими проектный режим вытяжек по клетям. Расходомер РМ1 установлен в сливной линии ретурных цилиндров ЦР пресса. Настройку по скоростям редукционного стана на первом этапе следует считать достаточно грубой, однако такая настройка рассматривается как предварение регулирования скоростей прокатки.

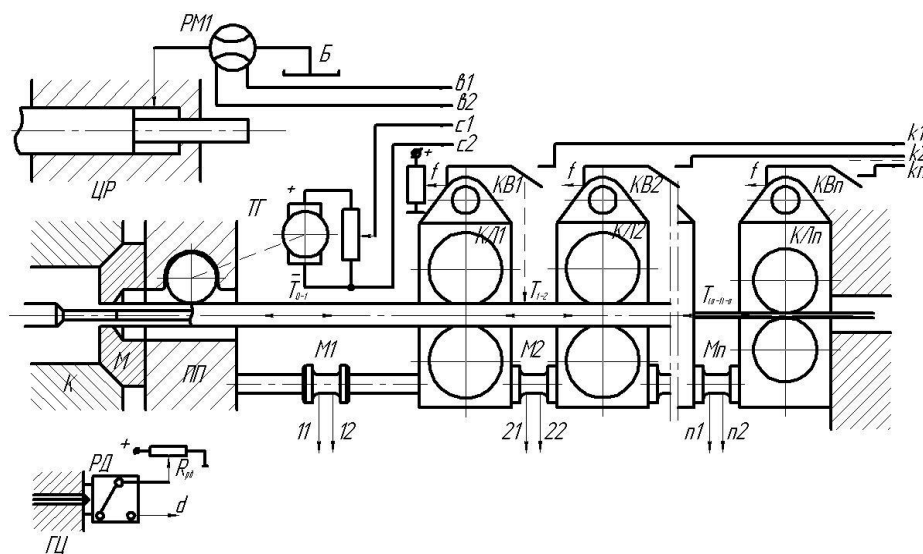


Рис. 2.21. Система сбора исходной информации с объекта регулирования (пресс-стан)

Сигналом, запускающим систему управления для реализации первого этапа скоростной настройки стана, является потенциал d , снимаемый с делителя напряжений R_{pd} после срабатывания реле давления РД. Последнее установлено в напорной магистрали или в корпусе главного цилиндра ГЦ пресса и настроено на давление рабочей жидкости, соответствующее усилию начала распрессовки слитка. Сигнал d калибруется по уровню напряжения под потенциал логической единицы (например, в соответствии с Международным логическим соглашением).

На втором этапе, технологически соответствующем началу истечения металла из матрицы, осуществляется точная установка скоростей вращения валков клеток в соответствии с установками по скоростям прокатки. Запускающим

сигналом является откалиброванная под логическую единицу разность потенциалов $C1-C2$, снимаемая с делителя напряжений, включенного на тахогенератор ТГ. Последнему придается вращение с частотой, пропорциональной скорости истечения трубы из матрицы. На рис. 2.21 в качестве примера показан обкатной ролик, прижимаемый к движущейся прессуемой трубе. Предполагается, что такой или подобный датчик скорости монтируется в корпусе передней поперечины ПП прессы в непосредственной близости от матрицы М.

Третий этап регулирования скоростного режима редуccionного стана начинается с момента входа трубы в первую клетку, что идентифицируется срабатыванием конечного выключателя КВ1 (например, датчик Холла, смонтированный в проводковом устройстве). На этом этапе осуществляется настройка стана по натяжениям. Информация о натяжении трубы между прессом и первой клеткой снимается с мессдозы М1. Сигнал о натяжении (11 – 12) сравнивается с установкой по натяжению T_{0-1} и устранением рассогласования за счет регулировки дросселя Д1 устанавливается предписанное натяжение прессуемой трубы. Конечные выключатели КВ i регистрируют вход труб в соответствующие i -е клетки, а информация с мессдоз М i используется для отработки заданных межклетевых натяжений трубы.

Вся информация, поступающая с датчиков объекта управления, преобразуется в двоичный код разрядности m посредством АЦП. Следовательно, все уставки по скорости прокатки и натяжениям трубы после прессы и между клетками также представляются кодами той же разрядности. В качестве примера на рис. 2.22 показана возможная и очень простая конфигурация блока уставок. Используемые регистры условно приняты однобайтовыми.

Регистры V_i используются для хранения информации о регламентированном технологией скоростном режиме прокатки. В клетях с гидроприводными валками скорость вращения отождествляется с расходом рабочей жидкости, поэтому регистры V_i хранят информацию о соотношениях расходов в смежных клетях. Эти соотношения равны вытяжкам в соответствующих клетях. При за-

писи двоичных кодов разрядности m в регистры V_i устанавливается соответствие между вытяжками λ_i в клетях стана и их двоичным представлением.

Если Q – общий расход рабочей жидкости при работе всех клеток стана с предписанными вытяжками, то $Q = \sum_{i=1}^n q_i$, где n – количество клеток в стане, q_i – расход рабочей жидкости в i -й клет. Можно записать

$$\frac{q_1}{Q} + \frac{q_1 \lambda_2}{Q} + \dots + \frac{q_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_i}{Q} + \dots + \frac{q_1 \prod_{j=2}^n \lambda_j}{Q} = 1.$$

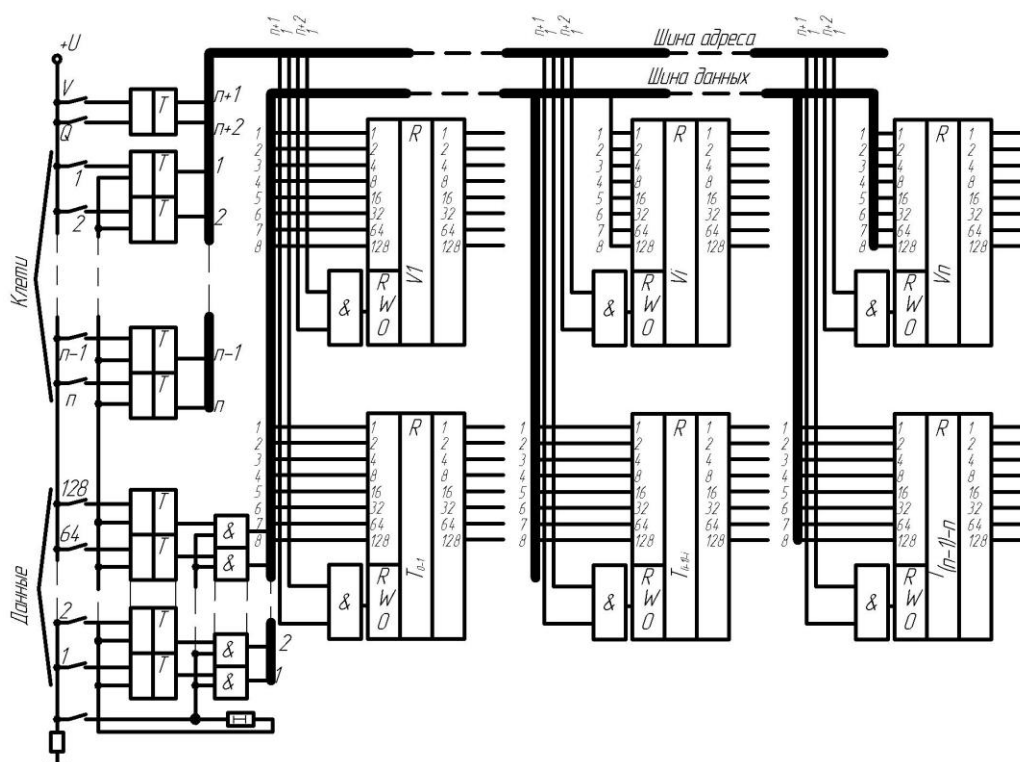


Рис. 2.22. Блок ввода уставок по скорости прокатки в n клетях (V_i) и по межклетевым натяжениям $T(i-1)-i$

Соответствие двоичных кодов уставки по скорости прокатки расходам рабочей жидкости в гидромоторах клеток устанавливается соотношением

$\frac{q_i}{Q} = \frac{K_i^V}{K}$, где $K = 2^m$, m – разрядность кодов представления информации (в примере на рис.2.22 $m = 8$); K_i^V – двоичный код расхода жидкости в i -й клет.

$$K_1^V = \frac{K}{1 + \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \dots + \prod_{j=2}^n \lambda_j}; \quad K_i^V = \frac{K - \sum_{j=0}^{i-1} K_j^V}{1 + \lambda_{i+1} + \dots + \prod_{j=i+1}^n \lambda_j}, \text{ при } K_0 = 0.$$

Поскольку при проектировании технологии редуccionной прокатки определяются площади сечения трубы F_i после каждого прохода и сопротивление металла деформации σ_{si} , то определяется максимально допустимое межклетевое натяжение трубы между $(i-1)$ -й и i -й клетями $T_{(i-1)-i}^{\max}$ и между прессом и первой клетью T_{0-1}^{\max} .

$T_{(i-1)-1}^{\max} = F_{i-1} \sigma_{i-1}$; $T_{0-1}^{\max} = F_0 \sigma_{s0}$, где F_0 – площадь сечения прессованной трубы, σ_{s0} – сопротивление деформации металла горячепрессованной трубы с учетом динамического разупрочнения.

Относительные напряжения натяжений Z_i назначаются из технологических соображений. В таком случае кодировка межклетевых натяжений при формировании уставки в регистрах $T_{(i-1)-i}$ определяется из соотношения

$$\frac{T_{(i-1)-i}}{T_{(i-1)-i}^{\max}} = \frac{K_i^T}{2^m}, \text{ где } K_i^T \text{ – двоичный код, помещаемый в регистр } T_{(i-1)-i}.$$

На первых двух этапах регулирования скоростного режима осуществляется управление общим по стану расходом рабочей жидкости посредством регулятора расхода РР (рис. 2.20) и шагового мотора ШД0. Система работает по отклонению регулируемого параметра, в качестве которого рассматривается различие нормированных сигналов расходомеров РМ1 и РМ2. Корректировка скоростей всех клеток на втором этапе выполняется по сигналу, снимаемому с тахогенератора ТГ. При этом скорость первой клетки в соответствии с уставкой устанавливается регулированием расхода Q , а всех остальных клеток – регулированием q_i , посредством дросселей Д_і и ШД_і. Поскольку уставка по скорости представлена кодом, отображающим отношение частного расхода q_i к общему

Q , то отработка заданной скорости осуществляется вне зависимости от изменяющегося общего расхода рабочей жидкости.

Возможный вариант схемы корректировки расходов рабочей жидкости i -й клетки при отработке скоростного режима и режима межклетевых натяжений в соответствии с уставками, помещенными в регистры V_i и $T_{(i-1)-i}$, показан на рис. 2.23.

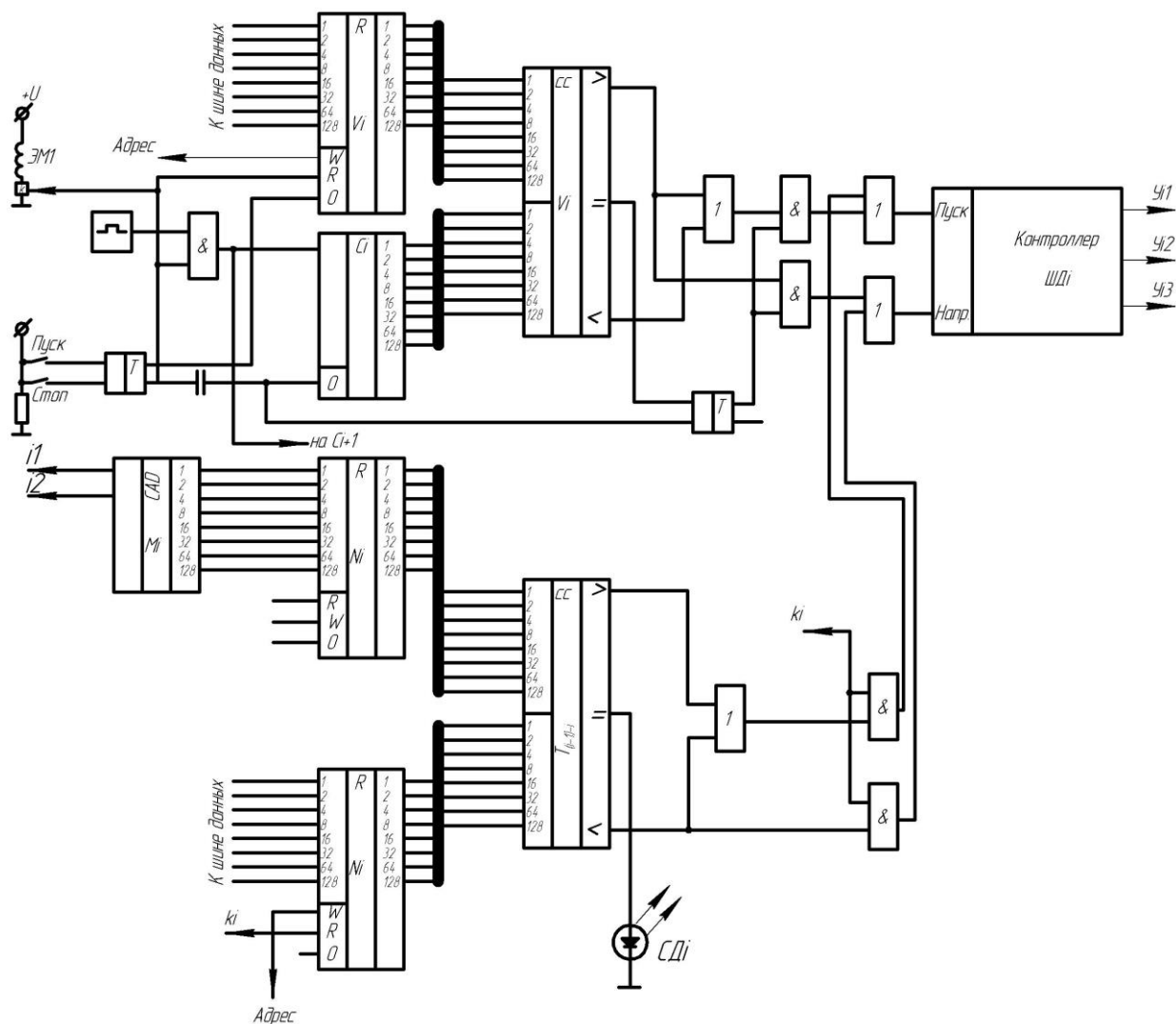


Рис. 2.23. Вариант схемы корректировки расхода рабочей жидкости i -й клетки по уставкам скорости и межклетевого натяжения

Пусковая часть является общей для всех клеток и обеспечивает счетный режим работы счетчиков C_i и их обнуление в момент запуска. До момента входа трубы в i -ю клетку работает верхняя часть схемы, где осуществляется сравнение кодов счетчика C_i и регистра V_i . При наличии рассогласования того или иного знака подключается контроллер шагового двигателя ШД i , направление

вращения которого установлено таким образом, что отверстие дросселя D_i растёт до тех пор, пока код V_i больше кода C_i . В момент совпадения кодов на вход «Пуск» контроллера подается «0» и регулирование дросселя прекращается. В этот момент дроссель остается в позиции, соответствующей заданному технологией отношению q_i/Q . Изменение скорости вращения валков клетки с этого момента возможно только за счет изменения Q . При отключении схемы ключом «Стоп» пусковой триггер T обнуляет выходную шину регистра V_i и ШД i отрабатывает дроссель в исходную позицию (перекрывается дроссельное отверстие).

При входе трубы в i -ю клетку стана конечный выключатель K_i выдает сигнал на вход считывания регистра $T(i-1)-i$, а сигнал $i1-i2$ с мессдозы M_i , установленной между $(i-1)$ -й и i -й клетками поступает на вход АЦП САД M_i .

Схема сравнения СС $T(i-1)-i$ вновь запускает в соответствующем направлении ШД i для отработки заданного межклетевого натяжения. Момент совпадения кодов регистров M_i и $T(i-1)-i$ индуцируется светодиодом СД i .

Контроллеры шаговых двигателей имеют идентичную структуру и снабжены собственным генератором счетных импульсов с частотой, совпадающей с генератором счетчиков C_i .

ПЗУ контроллера прошивается в соответствии с системой уравнений

$$\begin{cases} y1 = \bar{x}1 \cdot \bar{x}2 \cdot \bar{x}3 + x1 \cdot \bar{x}2 \cdot x4 + \bar{x}2 \cdot x3 \cdot \bar{x}4 \\ y2 = \bar{x}1 \cdot \bar{x}2 \cdot x3 \cdot \bar{x}4 + x1 \cdot \bar{x}2 \cdot \bar{x}3 \cdot x4 + \bar{x}1 \cdot x2 \\ y3 = x1 \cdot \bar{x}2 \cdot \bar{x}4 + \bar{x}1 \cdot \bar{x}2 \cdot x4 + \bar{x}1 \cdot x2 \cdot \bar{x}3 \cdot x4 + \bar{x}1 \cdot x2 \cdot x3 \cdot \bar{x}4 \end{cases}.$$

Описанный вариант системы автоматического скоростного согласования процессов прессования трубной заготовки и ее редукионно-растяжной прокатки решает все проблемы прямого совмещения этих технологических переделов и гарантирует получение горячекатаной трубы с заданной толщиной стенки за счет стабилизации режима межклетевых натяжений. Практическая реализация данной схемы осуществляется с использованием простой и дешевой элементной базы, или простейшего программируемого серийного контроллера, и доступна специалистам КИП практически любого промышленного предприятия.

Принципиально новым элементом алгоритма управления скоростным режимом работы редукционного стана при случайно изменяющейся скорости входа трубы является формирование уставки не по абсолютным значениям скоростей прокатки в каждой клетке, а по величинам отношений частных расходов к общему по стану расходу рабочей жидкости.

2.5. Выводы

1. Предложенный вариант индивидуального гидропривода валков редукционно-растяжного стана позволяет реализовать достаточно гибкую систему автоматического управления с быстрой перестройкой режима прокатки с целью получения различного сортамента в пределах одного парка валков стана.
2. Выполнен анализ МКЭ деформаций гидромотора, на основании которого производится выбор зазоров между статором, ротором и разделительных роликов гидромотора роликолопастного типа конструкции кафедры ОМД УГТУ–УПИ.
3. Разработан алгоритм базового уровня системы управления скоростным режимом совмещенного процесса прессования-прокатки. Принципиально новым элементом алгоритма управления скоростным режимом работы непрерывного стана при случайно изменяющейся скорости входа полосы является формирование уставки не по абсолютным значениям скоростей прокатки в каждой клетке, а по величинам отношений частных расходов к общему по стану расходу рабочей жидкости.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ И ТРУБ В КАЛИБРАХ КОНИЧЕСКИХ ВАЛКОВ

3.1. Описание конструкции экспериментальной установки и методика замера параметров прокатки

С целью сбора и анализа априорной информации о кинематике течения металла, а также об энергосиловых параметрах процесса многовалковой прокатки на конических валках спроектирована и изготовлена в условиях лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» УГТУ–УПИ экспериментальная четырехвалковая прокатная установка, монтируемая и приводимая в действие на универсальной испытательной машине УИМ-30 усилием 0,3 МН. Внешний вид установки показан на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Экспериментальная прокатная установка:

а – установка, смонтированная на УИМ-30; *б* – валковый узел с четырехвалковым квадратным калибром; *в* – валковая подушка

Конструктивные особенности прокатной установки иллюстрируются объемной схемой на рис. 3.2.

Корпус установки представляет собой две опорные плиты 1 и 2, соединенных четырьмя стойками 3. На внутренних поверхностях плит выполнены диагональные пазы, в которые помещаются с возможностью смещения направляющие выступы (см. рис. 3.1, *б*) подушек 4. Прокатные конические валки 5 закреплены на осях с подшипниковыми опорами в расточках подушек. На противоположном от валка конце оси закреплена приводимая шестерня 6, находящаяся в постоянном зацеплении с рейкой 7. Четыре зубчатые рейки верхними

торцами с подпятниками закреплены на поперечине 8, которая монтируется неподвижно на верхнем бойке испытательной машины. Подпятники реек выполнены с возможностью смещения относительно корпуса поперечины 8. В поперечных резьбовых расточках стоек 3 установлены мессдозы 9 для замера полного давления металла на валки при прокатке. Мессдозы 9 снабжены установленными в осевых каналах толкателями 10, опирающимися одним концом в дно стакана мессдозы, вторым – в корпус подушки. Оси мессдоз перпендикулярны коническим бочкам валков и параллельны направляющим пазам, по которым возможно смещение подушек. При установке клетки на испытательную машину нижняя плита 1 опирается на полую опору подвижной поперечины машины. Для вывода прокатанных заготовок из клетки используется осевой канал подвижной гидроприводной поперечины УИМ-30.

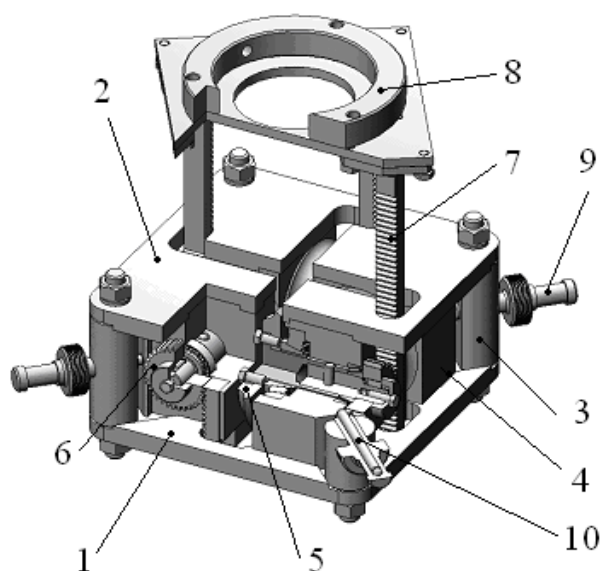


Рис. 3.2. Конструктивная схема экспериментальной прокатной установки:
 1,2 – плиты корпуса установки; 3 – стойка; 4 – подушка валка; 5 – валок;
 6 – шестерня привода валка; 7 – зубчатая рейка; 8 – поперечина; 9 – мессдоза;
 10 – толкатель

Замыкание четырех валков для формирования, в частности, круглого калибра показано на рис. 3.3. Рабочие валки крепятся на фланцах осей 11 и легко сменяются при переналадках прокатной клетки. На осях установлены радиально-упорные 12 и радиальные 13 подшипники качения. Шестерни 6 жестко закреплены на концах валковых осей 11 посредством двух шпонок и прижимного фланца 14.

При проведении опытной прокатки установка работает следующим образом. В исходном состоянии подвижная поперечина испытательной машины находится в крайнем нижнем положении. При этом благодаря жесткому закреплению поперечины 8 на верхнем неподвижном бойке машины зубчатые рейки 7

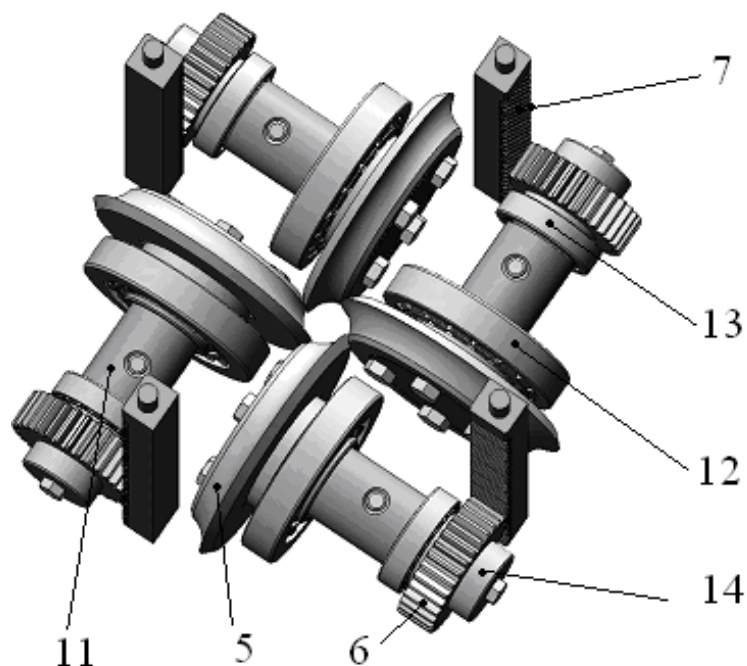


Рис. 3.3. Валковый узел прокатной установки:

5 – рабочий валок; 6 – шестерня привода валков; 7 – зубчатая рейка; 11 – ось валка; 12 – радиально-упорный подшипник; 13 – радиальный подшипник; 14 – прижимной фланец

полностью выведены вверх по отношению корпуса установки. Образец вводится нижним концом в зев валков через отверстие верхней плиты 2. После включения гидропривода машины подвижная поперечина поднимается и рейки 7, оставаясь неподвижными, приводят в синхронное вращение все валки 5.

Окружная скорость валков на среднем диаметре $2R$ определяется скоростью перемещения подвижной поперечины машины и равна $V_{\text{окр}} = V_{\text{м}} i$, где $i = \bar{R}/R_0$, R_0 – делительный радиус шестерни 6. Скорость прокатки регулируется дистрибутором испытательной машины в диапазоне от 0 до 1,5 м/мин.

Образец имеет ограниченную длину; при максимально реализуемой вытяжке ($\lambda = 1,7$) длина не превышает 160 мм и может быть увеличена до 200 мм при уменьшении вытяжки.

Прокатка завершается при выходе образца из валков, либо при избыточной длине образца, при соприкосновении поперечины 8 с верхней плитой 2 корпуса установки. После стравливания рабочей жидкости из главного цилиндра испытательной машины подвижная поперечина под собственным весом опускается в нижнее положение, выводя рейки из подушек. Валки при этом вращаются в обратном направлении. При возврате установки в исходное положение ее корпус удерживается на подвижной поперечине специальными тягами (см. рис. 3.1, *a*).

3.2. Автоматизированная система сбора, обработки и хранения опытных данных

Экспериментальная прокатная установка оснащена системой автоматического сбора и обработки сигналов, представляющих определяющие процесс технологические параметры:

- давление металла на валки P ;
- момент прокатки, $M_{\text{пр}}$;
- перемещение клетки (скорость перемещения клетки);
- скорость полосы на входе в прокатную клетку;
- скорость полосы на выходе из валков.

Усилие прокатки измеряется четырьмя мессдозами 9 (рис. 3.2), следовательно, отдельно на всех валках, что позволяет усреднять давление металла на валки при любой асимметрии очага деформации и, в частности, при перекосах образца на входе в валки.

Схема установки всех остальных датчиков показана на рис. 3.4. Для измерения момента прокатки и всех скоростей перемещений используются потенциометры, включенные в измерительные каналы устройства связи с объектами (УСО) по схеме делителей напряжений. Потенциометры запитаны от источников стабилизированного питания с гальванической развязкой каналов. К аналогичным источникам питания подключены тензометрические мостовые схемы мессдоз замера усилий прокатки.

Потенциометр, с помощью которого регистрируется сила испытательной машины P_M , приложенная одновременно к четырем рейкам, установлен на одном из элементов трансмиссии динамометра испытательной машины.

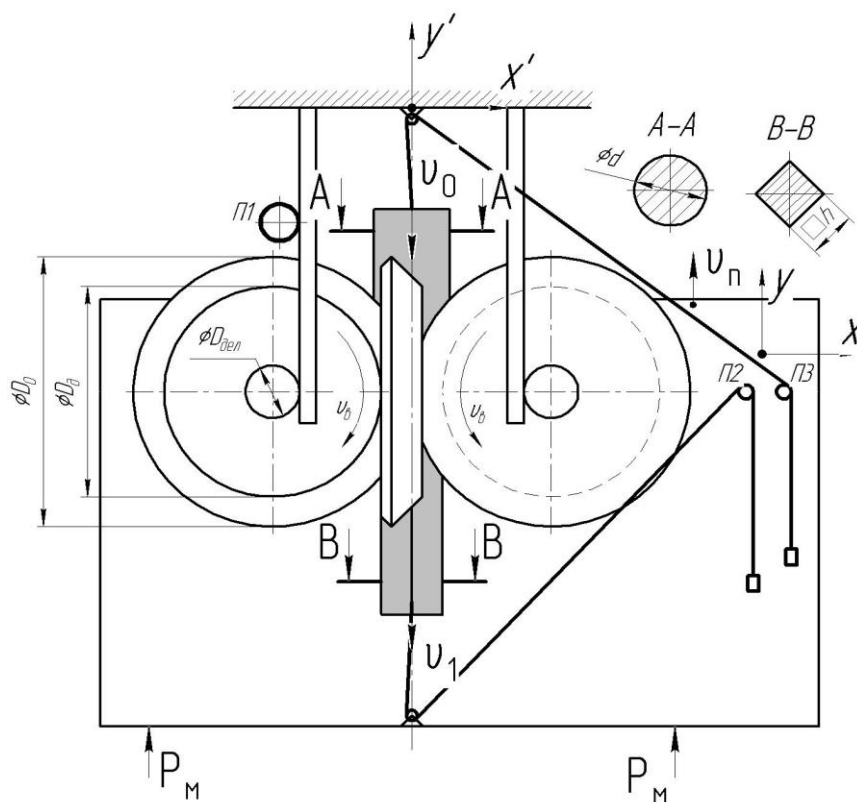


Рис. 3.4. Схема установки потенциометра для замера скоростей перемещений клетки и полосы на экспериментальной прокатной установке

Для замера момента прокатки регистрируются усилия испытательной машины P_M , а момент, приложенный ко всем четырем валкам, определяется выражением

$$M_{\text{пр}} = \frac{P_M R_0 i}{\eta},$$

где i – передаточное число привода валков;

η – КПД привода; в расчетах момента прокатки принимается $\eta=0,9$.

Потенциометр П1 (рис. 3.4) используется для замера скорости перемещения клетки V_M . Обрезиненный ролик на оси потенциометра кругового типа прижимается с регламентированным усилием к одной из реек 7 (рис. 3.5); корпус потенциометра закреплен на нижней плите 1 корпуса клетки. Для измерения скоростей полосы на входе и выходе валков установлены потенциометры П2 и

ПЗ, приводимые во вращение посредством нитей, охватывающих шкивы на осях потенциометров. Потенциометры установлены на подвижной поперечине, а ролики, через которые проводятся нити, установлены стационарно соответственно на верхнем бойке и в нижнем захвате машины. Концы нитей зачеканиваются в торцевые отверстия образца, а на противоположных концах для натяжения нитей закреплены противовесы, достаточные для предотвращения проскальзывания нитей на шкивах потенциометров.

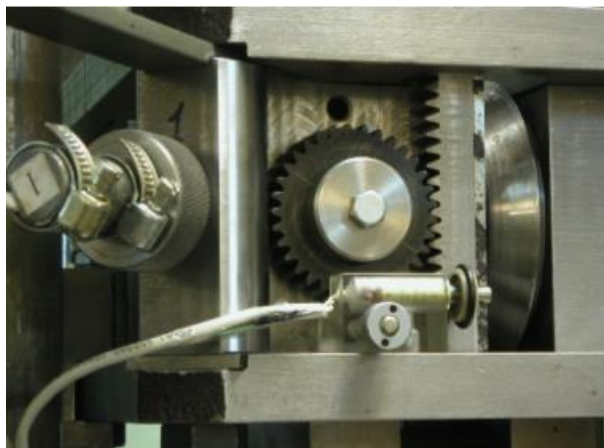


Рис. 3.5 Потенциометр замера скорости перемещения корпуса клетки при прокатке

Для автоматизации проведения экспериментов была создана автоматизированная система сбора и обработки информации. Структурная схема автоматизированной системы представлена на рис. 3.6.

Функционально автоматизированная система сбора и обработки информации состоит из:

- 1) системы сбора информации с датчиков установки;
- 2) системы передачи аналоговых сигналов для машинной обработки;
- 3) системы дискретизации (цифрования) аналоговой информации;
- 4) системы обработки полученной информации и представление ее в удобной для анализа форме;
- 5) системы анализа экспериментальных данных;
- 6) системы архивирования результатов экспериментов.

Аппаратная часть автоматизированной системы построена на тензометрических датчиках давления MC1, MC2, MC3, MC4 которые установлены на экспериментальной установке как опоры подушек валков, при этом усреднении-

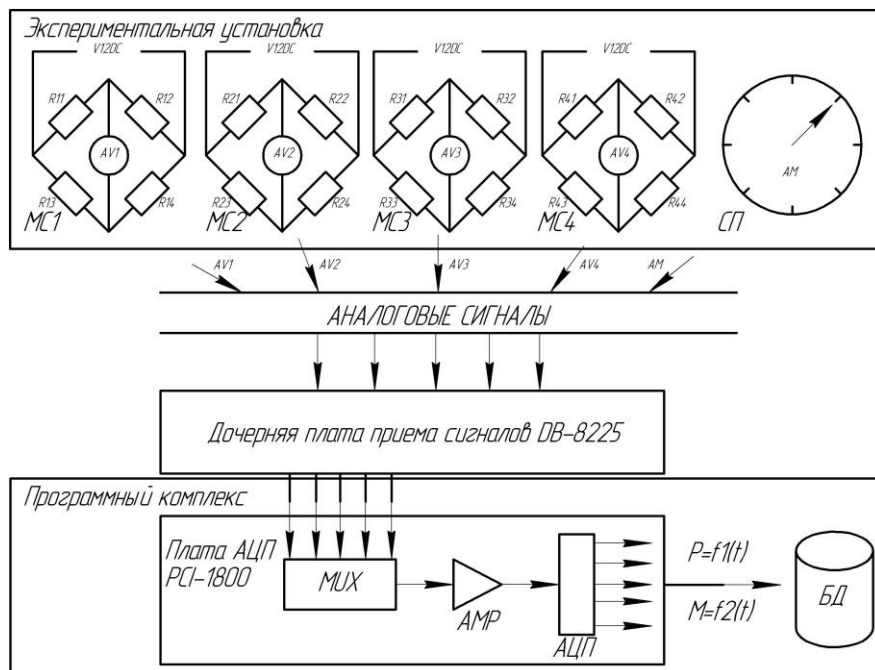


Рис. 3.6. Структура автоматизированной системы сбора и обработки данных

ем показаний четырех датчиков определяется полное усилие прокатки заготовки. Данные датчики питаются от источников постоянного тока V12DC и вырабатывают аналоговые сигналы AV1, AV2, AV3, AV4. Один датчик (СП) следит за показанием силы, развиваемой исполнительным органом экспериментальной установки, вырабатывая при этом аналоговый сигнал АМ, который позволяет определить момент прокатки.

Дочерняя плата служит средством сбора аналоговых сигналов с датчиков через помехоустойчивые линии связи и средством передачи этих сигналов непосредственно на модуль уплотнения (MUX). Дочерняя плата работает в дифференциальном режиме. В качестве преобразователя аналогового сигнала в цифровой служит плата PCI-1800. Данная плата содержит 12-битовый аналогово-цифровой преобразователь с частотой 330 кГц. После уплотнения сигналы проходят через усилитель AMP и аналогово-цифровой преобразователь.

Программная часть системы (см. приложение П1) построена на пакете программ PLAST. Пакет разработан в среде программирования Delphi и пред-

назначен для регистрации, обработки и анализа сигналов, поступающих с датчиков. Система регистрирует сигнал в виде численного значения входящих напряжений.

Работа с пакетом строится следующим образом:

- заполнение паспорта эксперимента;
- настройка режима сбора;
- проведение эксперимента;
- анализ полученной информации;
- архивация необходимой информации.

Настройка отчета об испытании несет за собой информационный характер далее необходимый для идентификации результатов проведенного эксперимента. Пакет программ позволяет варьировать параметры сбора информации в широком диапазоне. В качестве варьируемых параметров выступают: частота сбора информации с датчиков системы; продолжительность процесса сбора информации; интервал предполагаемых входных напряжений. Основное окно программного комплекса показано на рис. 3.7.

В этом окне происходит запуск и остановка процесса сбора информации. Данное окно отображает все параметры, необходимые для детального описания хода событий во время процесса: время, прошедшее с начала сбора информации, и число уже произведенных обращений к каждому источнику сигнала (датчику).

В результате проведения эксперимента программа фиксирует историю колебания основных технологических параметров во времени, т.е. строит функции $AV1 = f_1(\tau)$, $AV2 = f_2(\tau)$, $AV3 = f_3(\tau)$, $AV4 = f_4(\tau)$, $AM = f_5(\tau)$. Для анализа полученные данные обрабатываются и строятся функции истории изменения полного усилия прокатки и момента прокатки во времени, т.е. $P = P(\tau)$, $M = M(\tau)$.

Экспериментальные данные заносятся в базу данных, накопление и анализ которых позволяет изучить данный процесс и разработать методику расчета основных технологических параметров.

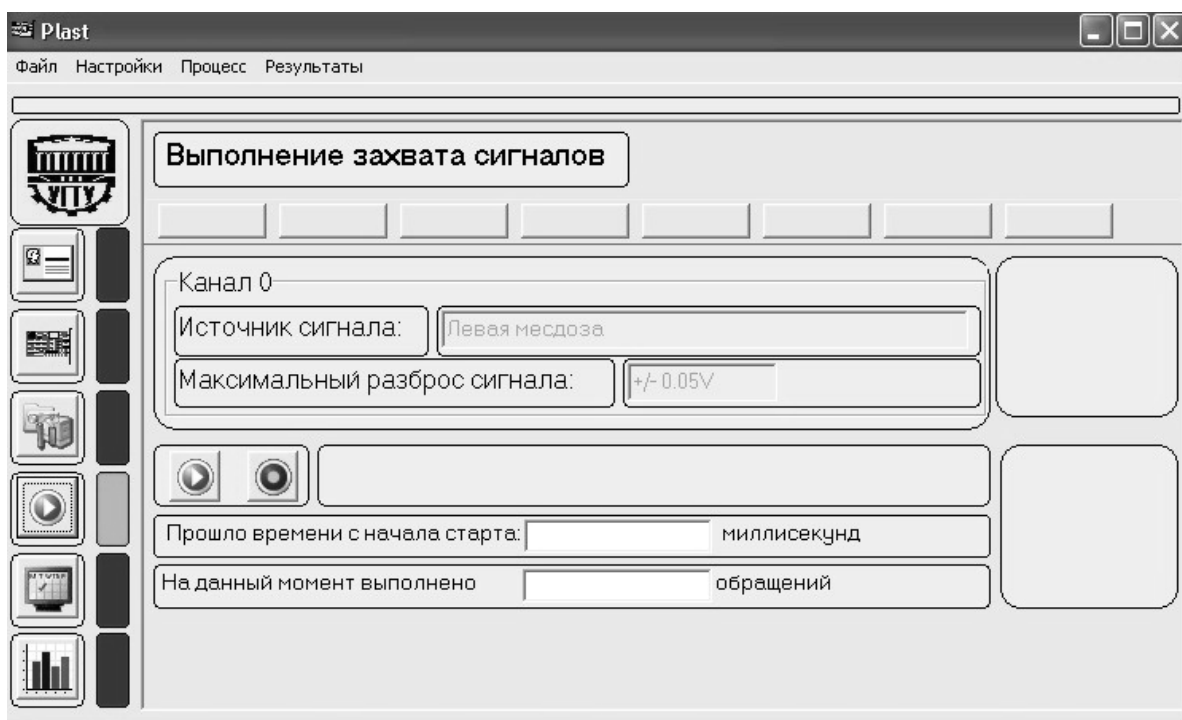


Рис. 3.7. Основное окно программного комплекса экспериментальной установки

3.3. Результаты экспериментального определения параметров как априорная информация о процессе прокатки в калибрах конических валков

В пределах экспериментальных возможностей созданной опытной установки четырехвалкового обжатия в квадратном и круглом калибрах конических валков осуществлено определение ряда технологических параметров прокатки прутков по схемам круг–квадрат и квадрат–круг, а также труб в круглом калибре без эксцентриситета ручьев. Полученная информация необходима для корректировки математических моделей в конечно-элементной постановке и для проверки адекватности этих моделей. Экспериментальная даже сравнительно скудная информация о процессе прокатки в калибрах конических валков не может быть почерпнута из опубликованных источников, поскольку этот процесс сравнительно новый и совершенно не исследованный. Прокатку в калибрах как прутков, так и труб следует отнести к процессам прокатки с кручением, при котором, в сравнении с традиционной многовалковой прокаткой меняются кинематические и энергосиловые параметры. Прежние постановки задачи редуccionной прокатки, сводимой к осесимметричной схеме напряженно-

деформированного состояния, не позволяют определить параметры скручивания прутка или трубы в зоне обжата и оценить влияние количества валков и формы ручьев на величину уширения и степень заполнения калибров, и, следовательно, установить максимально допустимые вытяжки, как при прокатке простых сортовых профилей, так и труб.

Изучение прокатки прутков по схемам круг–квадрат и квадрат–круг осуществлялось в четырехвалковых калибрах, образованных коническими бочками (рис. 3.8,а), или радиальными ручьями, нарезанными на конических бочках валков (рис. 3.8,б). Грибовидные валки помещались в подушки, которые в корпусе устанавливались таким образом, что валки формировали необходимый калибр. Взаимное положение подушек при формировании круглого калибра показано на рис. 3.9.

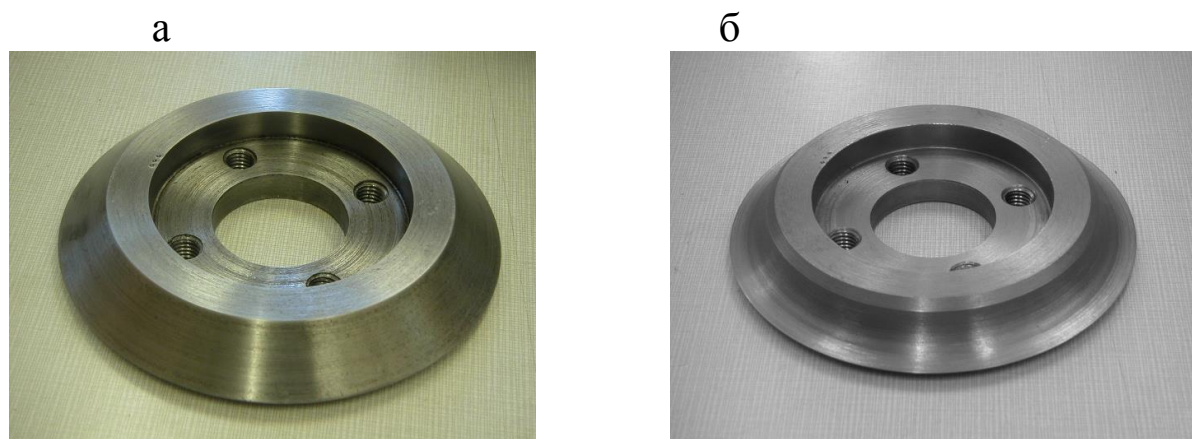


Рис. 3.8. Прокатные валки для квадратного (а) и круглого (б) калибров

Внешний и, следовательно, максимальный диаметр валков в калибрах $D = 130$ мм. Сторона квадрата калибра $a = 18$ мм, диаметр круглого калибра – $d = 25$ мм. Максимальные диаметры валков в обоих калибрах $D_1 = 104,5$ мм, а относительные диаметры валков составляли: для квадратного $A = \frac{D + D_1}{2a} = 6,5$;

для круглого $A = \frac{D + D_1}{2d} = 4,7$. Средний диаметр валков в калибрах

$\bar{D} = 117,25$ мм.

В качестве модельного материала для реализации горячей деформации использовался свинец марки С1, а заготовки для обеих схем прокатки изготавливались прессованием из литого слитка диаметром 75 мм. Механические

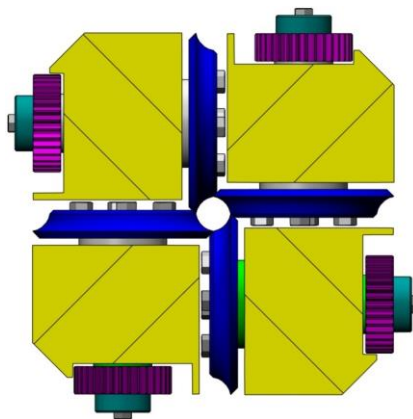


Рис. 3.9. Схема установки подушек валков при формировании круглого четырехвалкового калибра

свойства свинца достаточно надежно описывались уравнением $\sigma_s = (19,55 + 89,78\varepsilon - 174,5\varepsilon^2 + 110\xi^3) \cdot 3,38e^{-0,0052t} \cdot 0,69 \cdot \xi^{0,161}$, полученным опытной корректировкой зависимости $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, t, \xi)$, приведенной в работе [142] для свинца марки С00. Корректировка проводилась с варьированием ε в диапазоне от 0,05 до 0,5 при $t = 20^\circ\text{C}$ и $\xi = 0,01\text{c}^{-1}$. В приведенной формуле $\varepsilon = \ln(\lambda)$, где λ – коэффициент вытяжки при прокатке.

Скорость движения полосы при проведении опытных прокаток определялась на входе V_0 и на выходе V_1 клетки, что давало возможность оценить скорость деформации $\xi = \varepsilon \bar{V} / l$, где $\bar{V} = (V_0 + V_1) / 2$ – средняя скорость прокатки; l – длина зоны обжатия. Поскольку опыты проводились на испытательной машине, скорость деформации была невелика и составляла от 0,01 до 0,02с⁻¹. Усилие прокатки записывалось по показаниям двух мессдоз, расположенных на двух взаимно-перпендикулярных диагоналях устройства, нормальных к образующей бочек конических валков. Тарировки мессдоз осуществлялись прямым нагружением толкателей на аттестованной испытательной машине УИМ-10. Поскольку тарировочные графики всех мессдоз достаточно линейны, в программу обработки данных вводился лишь коэффициент жесткости, и диаграм-

мы изменения усилия прокатки выводились на печать в реальном масштабе и в реальном времени. На рис. 3.10 в качестве примера приведена диаграмма усилия прокатки P_H , по схеме круг–квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,52$.

Выведенные импульсы отсчета времени имеют период 0,5 с. Частота вращения валков в представленном проходе составляла $n = 0,282$ об/мин. Катающий диаметр, определяемый по показаниям ходографов, $D_k = 112$ мм.

Поскольку тензометрическая мессдоза собрана по мостовой безусилительной схеме, коэффициент усиления УПТ устройства связи с объектом достаточно велик, что порождает постоянную пульсацию выходного сигнала. Значение измеренного параметра, в частности усилие прокатки, считывается по уровню горизонтальных площадок между импульсами. Приведенная на рис. 3.10 диаграмма записи усилия прокатки демонстрирует стабильность усилия в течение всего цикла прокатки и совпадение показаний двух мессдоз с взаимно перпендикулярными осями.

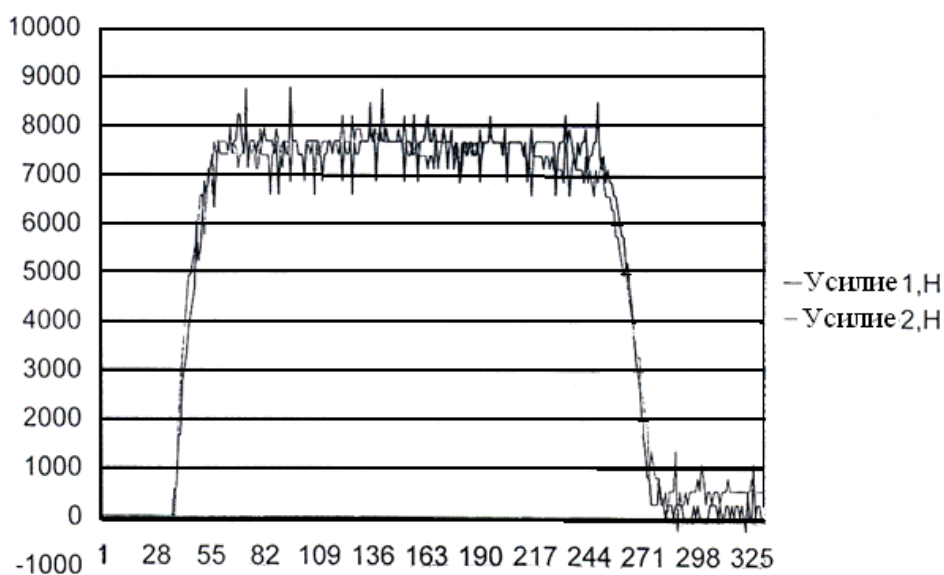


Рис. 3.10. Пример диаграммы записи усилия прокатки свинцовой круглой в сечении заготовки ($d_0=25$ мм) в квадратном калибре ($a=18$ мм) при относительном диаметре валков $A=6,5$

Экспериментально определены усилия прокатки при $A = 6,5$ в диапазоне изменения вытяжек от 1,07 до 1,52.

Момент прокатки M_{Π} в опытах замерялся потенциометрическим датчиком, включенным на аналоговый вход УСО по схеме делителя напряжения со

стабилизированным питанием от индивидуального источника. Потенциометр, механически связанный с системой силоизмерения испытательной машины, позволяет зарегистрировать полное усилие, приложенное ко всем четырем рейкам

привода валков $i = \bar{D}/d_{ш}$, где $d_{ш}$ – делительный диаметр шестерни реечного механизма, в конкретном конструктивном испытании равно 1,78. Коэффициент полезного действия привода определен расчетным путем и составляет $\eta = 0,9$.

Суммарный для четырех валков момент прокатки $M_{\pi} = \frac{P_m \eta}{i}$, где P_m – усилие испытательной машины. Колебания величины P_m в процессе прокатки существенно выше, чем усилие прокатки, поэтому момент определялся как средне-интегральное значение, определяемое программно при обработке результатов замера. На рис. 3.11 в качестве примера показана диаграмма замера момента прокатки без корректировки по передаточному числу и коэффициенту полезного действия.

Диаграмма на рис. 3.11 в среднем соответствует суммарному моменту прокатки $M_{\pi} = 162$ Нм. Начальная и конечная горизонтальная площадка на диаграмме соответствуют моменту холостого хода.

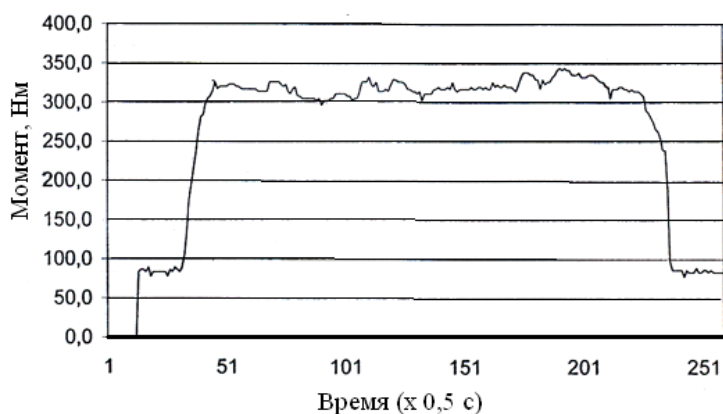


Рис. 3.11. Пример диаграммной записи суммарного момента прокатки по схеме круг–квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,32$

При прокатке круглой заготовки в квадратном калибре полоса выходит из валков с небольшим углом относительного скручивания. Входящий же свободный конец полосы интенсивно вращается, и все пластическое скручивание ло-

кализуется в зоне обжатия. Остаточный угол скручивания определяется упругим последствием и, следовательно, зависит только от жесткости материала полосы и вытяжки при прокатке. На рис. 3.12 показана зависимость удельного (на 1 мм длины зоны обжатия) остаточного угла скручивания квадратной полосы после прокатки по схеме круг–квадрат. При вытяжках более 1,25 остаточный угол скручивания остается практически неизменным. Контактные условия трения не оказывают влияния на остаточный относительный угол скручивания, что установлено сопоставлением прокатки на обезмасленных и смазанных валах.

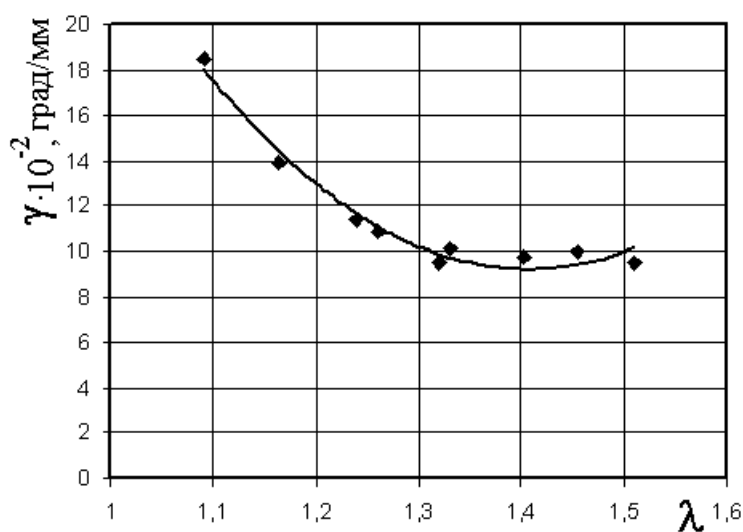


Рис. 3.12. Удельные остаточные углы скручивания полосы после прокатки в квадратном калибре конических валков по схеме круг–квадрат

Интенсивное скручивание полосы в зоне обжатия в случае, когда к выходящему концу полосы не приложен крутящий момент, препятствующий скручиванию, позволяет говорить о возможности формирования спиральной текстуры металла. Удельные углы скручивания растут с вытяжкой и стабилизируются при $\lambda > 1,4$ (рис. 3.13).

Экспериментально углы скручивания определяли просто и достаточно точно методом торцевых рисок, нанесенных на образцы заданной длины. Этим методом определяется удельный угол скручивания полосы в зоне обжатия φ , а по развороту граней прокатанной полосы замеряется остаточный угол скручивания γ , также приводимый к единице длины зоны обжатия. Остаточное скру-

чивание появляется всегда при отсутствии заневоливания выходящего конца полосы. Момент заневоливания переднего конца полосы определяется выражением: $M = 0,2 \tau_{s1} a^3$, где τ_{s1} – сопротивление сдвиговой деформации металла на выходе из валков.

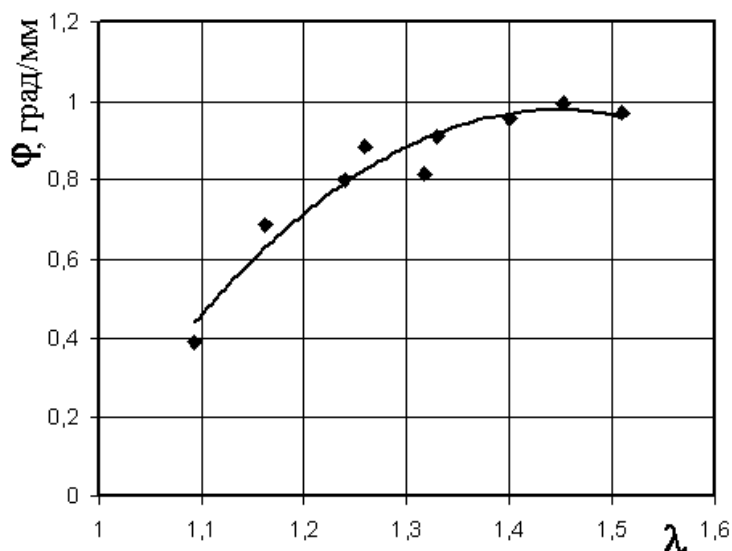


Рис. 3.13. Удельные (на 1 мм длины очага деформации) углы скручивания полосы в зоне обжатия при прокатке по схеме круг–квадрат

В случае заневоливания переднего конца полосы угол скручивания в зоне обжатия представляет сумму $\phi = \varphi + \gamma$. Рост γ при уменьшении обжатия объясняется смятием контактной зоны при ее малой ширине $b = \sqrt{d_1^2 - a^2}$ под действием возникающего в очаге деформации крутящего момента M_k . Хотя угол остаточного скручивания сравнительно мал, особенно в диапазоне практически приемлемых вытяжек, его следует учитывать при установке проводковых устройств последующих клеток непрерывной группы. В случае применения квадратного калибра в качестве чистового выводные проводки должны быть рассчитаны на возможность раскручивания профиля с учетом упругого последдействия, величина которого зависит от расстояния между плоскостями осей валков клетки и роликов раскручивающей проводки.

В случае прокатки по схеме квадрат–круг вращение входящего конца полосы недопустимо и скручивание полосы в зоне обжатия приводит к вращению выходящего конца полосы при отсутствии его заневоливания. Установлено, что

существует определенное угловое положение квадратного сечения полосы относительно калибра, при котором вращение входящего конца отсутствует и, следовательно, не требуется установка специального проводкового устройства.

Максимальная вытяжка при прокатке по схеме квадрат–круг достигается именно при этом угловом положении полосы по отношению к продольным плоскостям, проходящим через точки соприкосновения валков. На рис. 3.14 схематично показано угловое положение квадратной полосы $a \times a$, входящей в круглый калибр диаметром $d_{кр}$. Угол задачи полосы α определяет асимметрию тангенциального течения металла полосы по поверхности ручья каждого валка. Оптимальный угол характеризует симметрию этого течения и определяет максимально возможную вытяжку при прокатке без переполнения калибра.

При прокатке свинцовых полос с различными вытяжками и контактными условиями трения установлено, что угол $\alpha = 35...38^\circ$ обеспечивает прокатку без риска формирования заусенцев.

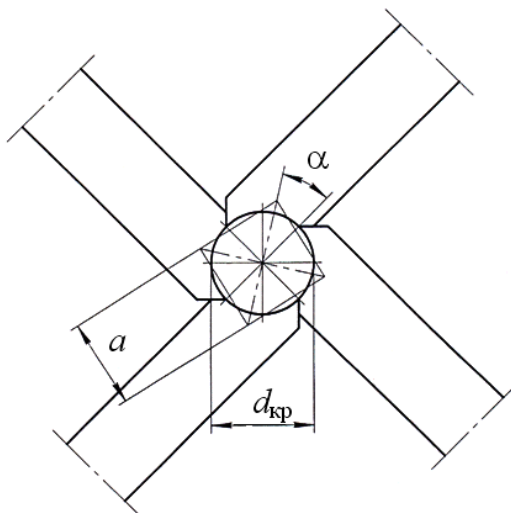


Рис. 3.14. Схема входа квадратной полосы в круглый калибр конических валков

Аналогичная ситуация возникает при прокатке по схеме квадрат–квадрат. На рис. 3.15 показано угловое положение сечения входящей в калибр полосы. Угол разворота около 20° обеспечивает отсутствие вращения свободного входящего конца квадратной полосы и позволяет катать с максимальными вытяжками.

Представляет интерес влияние крутящего момента, прикладываемого к входящей в валки полосе для устранения ее кручения и скручивания при прокатке на конических валках, на силовые параметры прокатки. Дополнительные сдвиговые напряжения в сечениях полосы, возникающие под действием приложенного внешнего крутящего момента, способствуют снижению нормальных

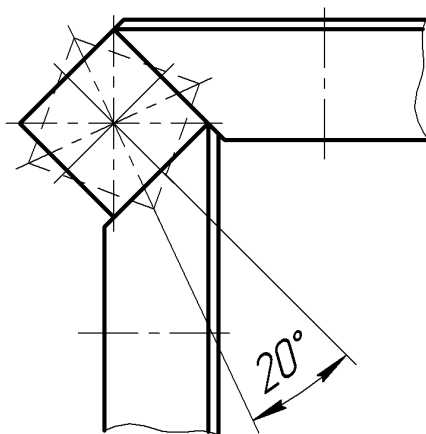


Рис. 3.15. Ввод квадратной полосы в квадратный калибр конических валков

контактных давлений и полного давления металла на валки. Такое влияние крутящего момента на величину P можно пронаблюдать на диаграмме записи усилия прокатки. Такая диаграмма для прокатки свинцовой полосы по схеме круг–квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,52$ представлена на рис. 3.16.

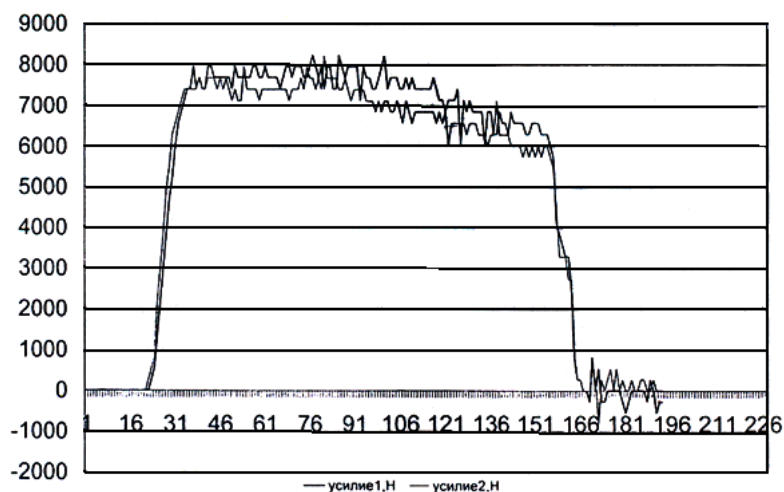


Рис. 3.16. Диаграмма записи во времени давления металла на валки при прокатке по схеме круг–квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,52$ с приложением к полосе внешнего крутящего момента

На первом этапе прокатки в течение 40 с прокатка проводилась со свободным входящим концом полосы. Далее с помощью рычажного устройства к

полосе приложен плавно возрастающий крутящий момент до начала видимого упругопластического кручения. Внешний момент, приводящий к пластическому скручиванию полосы на входе в зону обжатия и равный $M = \frac{\pi_s d_0^3}{16}$, следует считать предельно допустимым при прокатке.

Опыты показали, что при приложении крутящего момента к заднему концу полосы, препятствующего скручиванию полосы в зоны обжатия, возможно снижение усилия прокатки на 20 % и момента прокатки на 10...12 %. Если прокатку в многовалковых калибрах на конических валках осуществлять в непрерывной группе клетей, то каждая предыдущая клеть, воспринимая крутящий момент, будет препятствовать скручиванию полосы в последующей клетке. Это позволит снизить давление металла на валки во всех клетях и в итоге повысить точность проката без специальных мер по повышению жесткости клетей. Снижение момента прокатки не столь значительно как усилие, но тем не менее при многопроходной прокатке может положительно сказаться на энергосбережении.

Важным параметром прокатки в калибрах, знание которого необходимо для скоростного согласования приводов клетей в непрерывных группах, является катающий диаметр D_k , окружная скорость валков на котором равна скорости выхода полосы из валков. Экспериментальное определение D_k при непрерывной регистрации частоты вращения валков и скорости выхода полосы не представляет трудностей. В итоге время, установления положения и формы критической линии на контактной поверхности, разделяющей зоны опережения и отставания, опытным путем не представляется возможным. Потенциометрические датчики позволяют непосредственно измерять скорости полосы на выходе из клетки V_1 и движения клетки $V_{кл}$. Реечный привод с шестернями диаметром делительных окружностей $d_{ш}$ преобразует поступательное движение клетки во вращательное валков. Катающий диаметр определяется выражением:

$$D_k = d_{ш} \frac{V_1}{V_{кл}}.$$

Удобно представлять катающий диаметр в безразмерном виде в функции вытяжки λ , как наиболее статистически значимого параметра. На рис. 3.17 показана зависимость относительного катающего диаметра

$$\eta = 1 - \frac{D - D_k}{\sqrt{2} \cdot a},$$

от коэффициента вытяжки λ ; $\eta = 1$ при $D_k = D$, то есть наибольшему диаметру валка в калибре; $\eta = 0$ при $D_k = D_1 = D - 2a/\sqrt{2}$, то есть наименьшему диаметру валка в калибре; $\eta = 0,5$ при $D_k = \bar{D}$, то есть среднему диаметру.

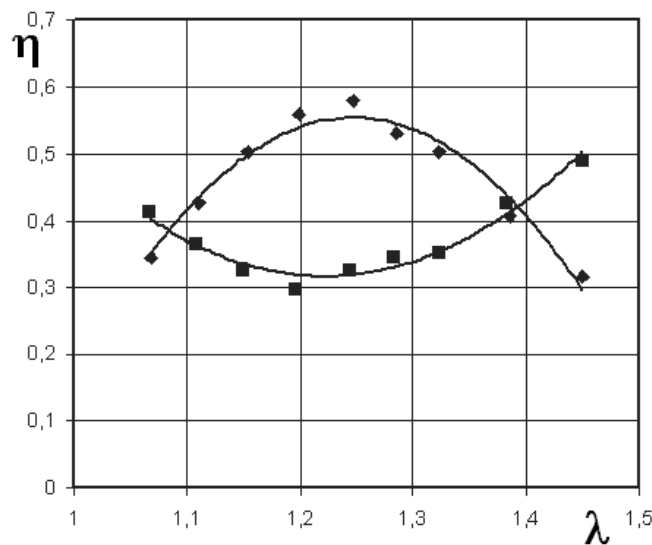


Рис. 3.17. Относительный катающий диаметр: \blacklozenge – прокатка по схеме круг–квадрат; \blacksquare – квадрат–круг

Зависимости аппроксимированы методом наименьших квадратов полиномами:

– для схемы круг–квадрат

$$\eta = 10,987\lambda^3 - 47,737\lambda^2 + 67,605\lambda - 30,778, \text{ при } R^2 = 0,9874;$$

– для схемы квадрат–круг

$$\eta = -7,5415\lambda^3 + 32,062\lambda^2 - 44,413\lambda + 20,471, \text{ при } R^2 = 0,9828,$$

где $R^2 = 1 - \frac{\sum (\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}{\sum \eta_i^2 - \left(\frac{\sum \eta_i}{N} \right)^2}$ – квадрат смешанной корреляции; η_i – i -е опыт-

ное значение; $\hat{\eta}_i$ – i -е значение аппроксимации; N – объем выборки.

Формоизменение заготовки при прокатке характеризовалось коэффициентом высотной деформации $1/\eta$, коэффициентом вытяжки λ и степенью заполнения калибров δ .

Коэффициент высотной деформации для случая прокатки по схеме круг–квадрат определялся выражением $1/\eta = d_0/a$ (рис. 3.18, а) и квадрат–круг – $1/\eta = a_1/d$ (рис. 3.18, б). Для определения коэффициентов вытяжки использовались выражения:

$$\text{– круг–квадрат } \lambda = \frac{\pi d_0^2}{4 \left(a b + \frac{\beta}{2} d_1^2 \right)} \quad (\text{рис. 3.18, а}),$$

$$\text{где } \beta = \frac{\pi}{2} - 2\alpha; \quad \alpha = \arctg(b/a);$$

$$\text{– квадрат–круг } \lambda = \frac{a_0^2}{b \cdot c + \frac{\beta}{2} d^2} \quad (\text{рис. 3.18, б}),$$

$$\text{где } \alpha = \arctg(b/c).$$

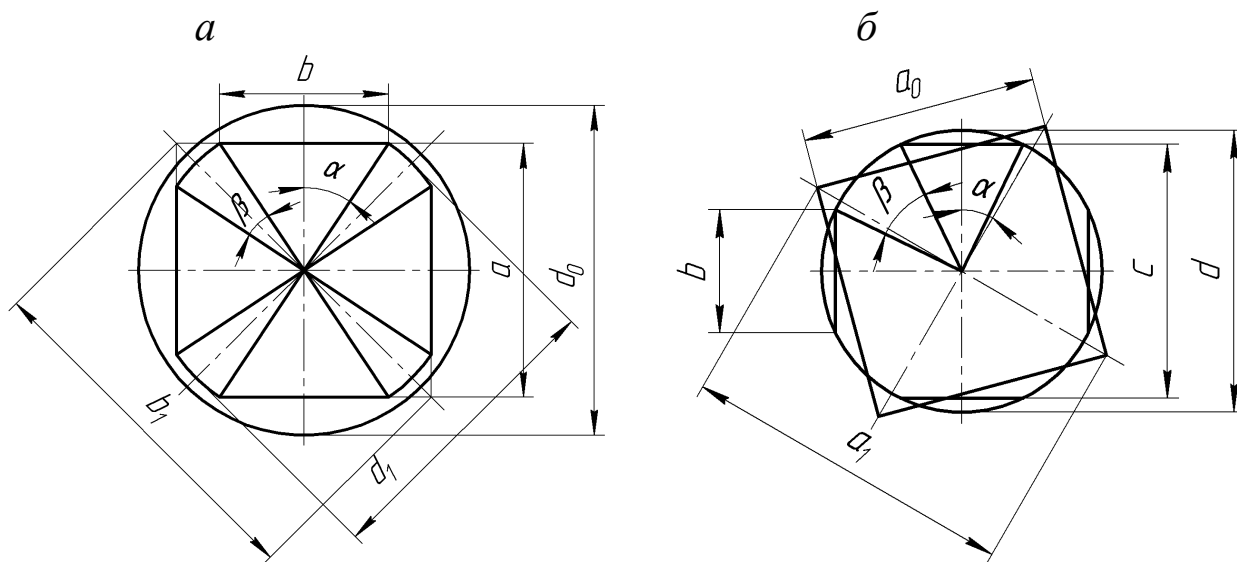


Рис. 3.18. Схемы формоизменения сечения заготовки при прокатке по схемам круг–квадрат (а) и квадрат–круг (б)

Под степенью заполнения калибров понимаются отношения:

– для схемы круг–квадрат $\delta = b_1 / d_1$ (рис. 3.18, а);

– для схемы квадрат–круг $\delta = c / d$ (рис. 3.18, б).

Зависимость λ от $1/\eta$ для двух схем прокатки приведена на рис. 3.19.

По величине степени заполнения можно судить о вытяжной способности калибров, которое определяется коэффициентом высотной деформации при $\delta=1$. Зависимость δ от $1/\eta$ для трех схем прокатки приведены на рис. 3.20.

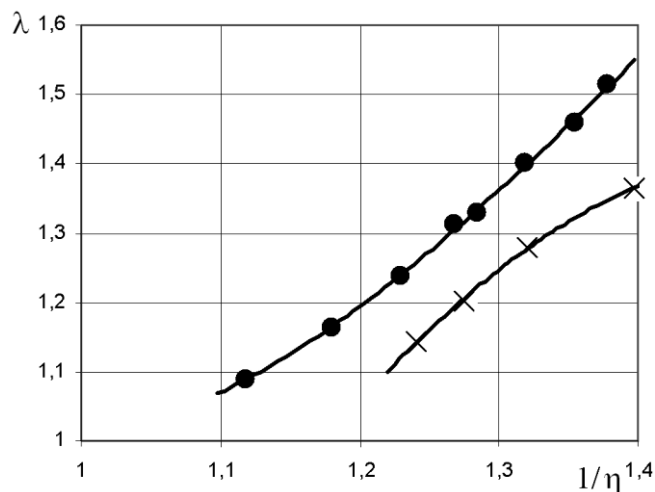


Рис. 3.19. Зависимость коэффициента вытяжки от коэффициента высотной деформации: ● – схема прокатки круг–квадрат; X – квадрат–круг

С целью определения энергосиловых параметров прокатки прутков по схемам круг–квадрат и квадрат–круг, на фотографиях недокатов производилось

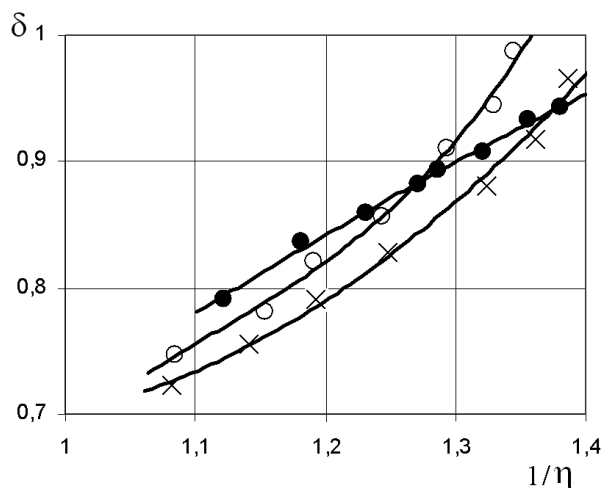


Рис. 3.20. Степени заполнения квадратного и круглого калибров конических валков: ● – круг–квадрат; ○ – квадрат–круг; X – квадрат–квадрат

измерение площадей контактной поверхности (рис. 3.21). По результатам измерения скоростей прокатки во всех случаях определялась средняя скорость деформации, которая укладывалась в интервал $[0,01 \dots 0,02] \text{с}^{-1}$ и по величине которой для реализуемых степеней деформации $\varepsilon = \ln(\lambda)$ находили значения со-

противления деформации модельного материала. Значение показателя напряженного состояния \bar{p}/σ_s , приведенные на рис. 3.22 даны в функции фактора формы очага деформации l/\bar{h} , где l – длина зоны обжатия; \bar{h} – средняя высота зоны обжатия. Для случая прокатки по схеме круг–квадрат $l = \frac{1}{2}\sqrt{(d_0 - a)(D + D_1)}$; $\bar{h} = \frac{d_0 + a}{2}$; для схемы квадрат–круг $l = \frac{1}{2}\sqrt{(a_1 - d)(D + D_1)}$; $\bar{h} = \frac{a_1 + d}{2}$.

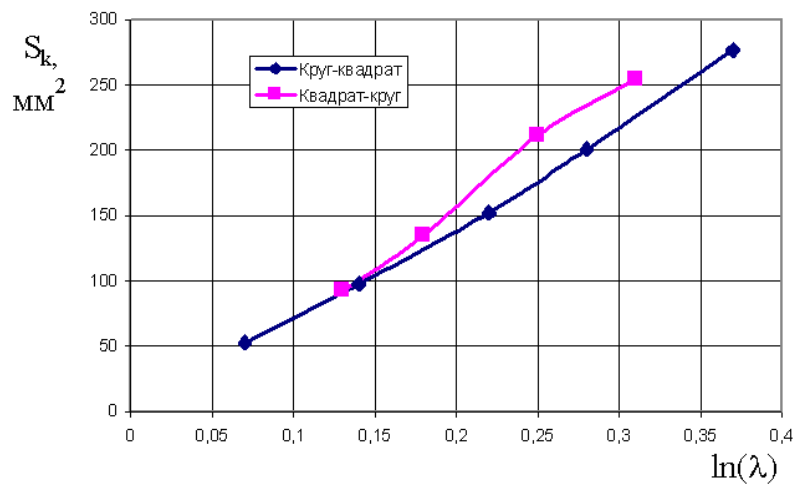


Рис. 3.21. Площадь контактной поверхности:
♦ – круг–квадрат; ■ – квадрат–круг

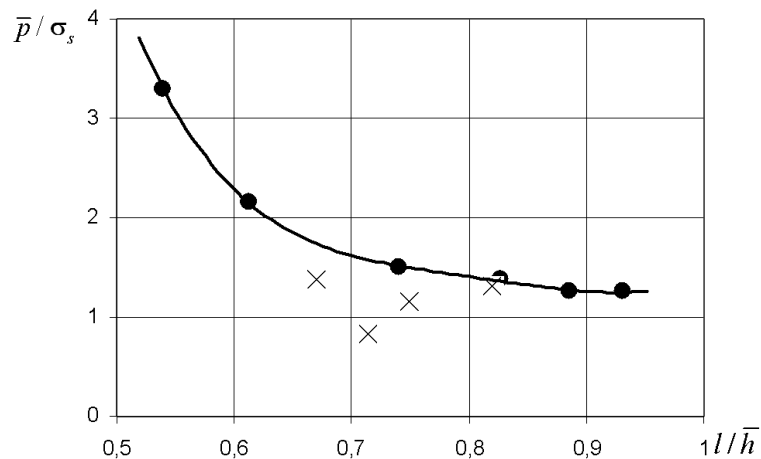


Рис. 3.22. Зависимость \bar{p}/σ_s от фактора очага деформации:
● – круг–квадрат; × – квадрат–круг

Из-за сложности ввода квадратной в сечении полосы в круглый и квадратный калибр без соответствующих проводковых устройств не удалось полу-

чить зависимость \bar{p}/σ_s от l/\bar{h} для случаев прокатки по схемам квадрат–круг и квадрат–квадрат. Связь между коэффициентом вытяжки и фактором формы очага деформации графически представлена на рис. 3.23.

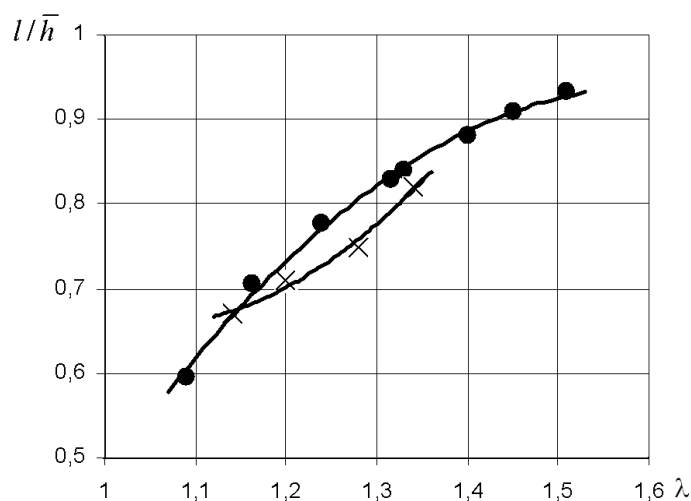


Рис. 3.23. Зависимость фактора формы очага деформации от коэффициента вытяжки при прокатке в четырехвалковых калибрах конических валков:
 ● – круг–квадрат; × – квадрат–круг

При определении момента прокатки по показаниям потенциометрического датчика коэффициент полезного действия линии привода валков учтен с помощью замера момента холостого хода, регламентируемого на диаграмме. Установлена удовлетворительная для проведения технологических расчетов стабильность безразмерного коэффициента

$$K_M = \frac{M}{P D_k},$$

где M – суммарный момент на четырех валках клетки; P – полное давление металла на валки.

Для случая прокатки по схеме круг–квадрат с $\lambda = 1,5$ $K_M = 0,3$ при среднем квадратичном отклонении 0,08, а по схеме квадрат–круг $K_M = 0,67 \pm 0,03$ ($\lambda = 1,35$).

Опытная прокатка труб проводилась в круглом четырехвалковом калибре. Ручьи на бочках конических валков выполнены без эксцентриситета и выпусков, лишь со скруглением реборд. Диаметр калибра d составлял 25,4 мм, а относительный диаметр валков $A = \bar{D}/d = 4,75$. Экспериментальный анализ

посвящен определению катающих диаметров и влиянию параметров прокатки труб без натяжений на относительное изменение толщины стенки трубы. Установлена зависимость относительного катающего диаметра от относительной толщины стенки трубной заготовки s_0/\bar{d} , где s_0 – исходная толщина стенки; \bar{d} – средний диаметр трубной заготовки, и относительного обжатия трубы по диаметру $\varepsilon = \Delta d/d_0$, где d_0 – исходный наружный диаметр трубы (рис. 3.24). При значении $s_0/\bar{d} < 0,07$ стенка трубы, как правило, теряет устойчивость в случае $\varepsilon > 0,05$.

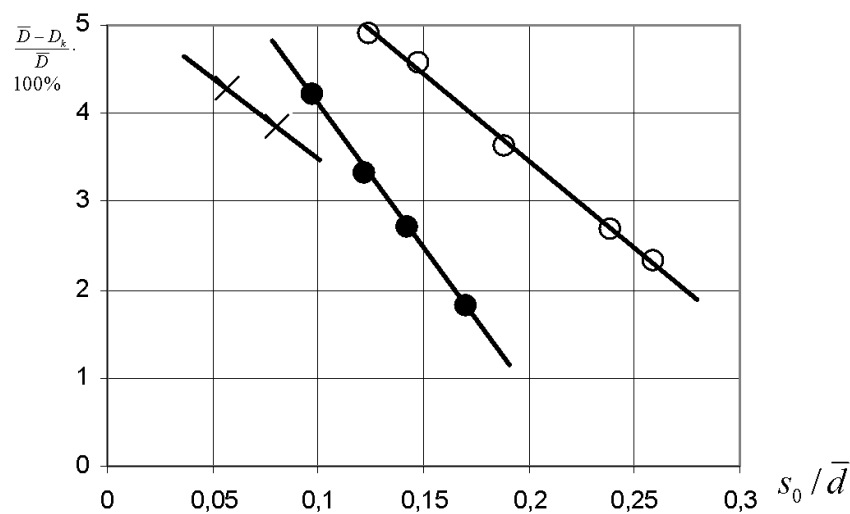


Рис. 3.24. Относительный катающий диаметр в зависимости от обжатия и относительной толщины стенки:
 \circ – $\varepsilon = 0,11..0,12$; \bullet – $\varepsilon = 0,08..0,09$; \times – $\varepsilon = 0,09$

При отсутствии натяжений наиболее значимыми параметрами, определяющими относительное утолщение стенки, является исходная относительная толщина стенки и величина обжатия по диаметру (рис. 3.25).

Толщина стенки трубы после прокатки рассчитывалась по формуле

$$s = \frac{d}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{L_0}{L} \cdot \frac{d_0^2 - d_{\text{BH}}^2}{d^2}} \right),$$

где d – наружный диаметр трубы после прокатки; L_0 – базовая длина заготовки до прокатки (рис. 3.26); L – базовая длина заготовки после прокатки.

Коэффициент вытяжки определялся отношением базовых длин $\lambda = L/L_0$.

При проведении прокатки заготовка заданной базовой длины L_0 измерялась

длина хода клетки ΔL , которой соответствует угол поворота валков $\varphi = 2\Delta L/d_{\text{ш}}$, рад. Катающий диаметр в этом случае $D_k = 2L/\varphi$.

В результате анализа процесса четырехвалковой прокатки труб без натяжения в круглом калибре конических валков было установлено существенное влияние на относительное изменение толщины стенки трубы отношение \bar{D}/d_0 .

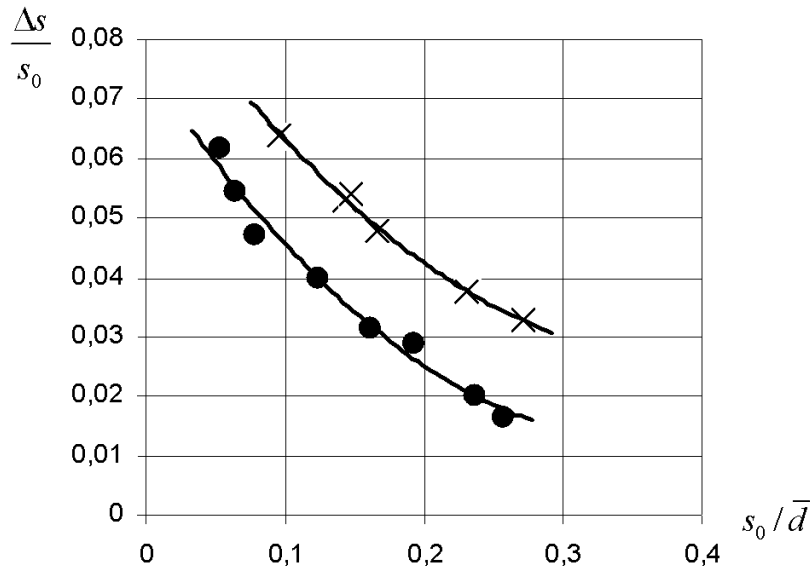


Рис. 3.25. Зависимость относительного утолщения стенки трубы от обжатия и относительной исходной толщины стенки при $A = 4,75$:
 ● – $\varepsilon = 0,08...0,09$; × – $\varepsilon = 0,11...0,12$

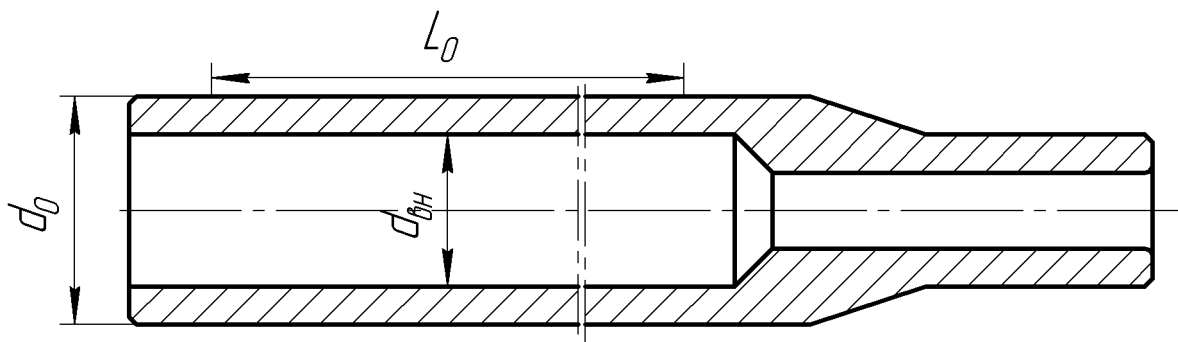


Рис. 3.26. Заготовка трубы для опытной прокатки

Заданная величина $\Delta s/s_0$ при определенном отношении \bar{D}/d_0 может быть обеспечена подбором обжатия по диаметру в соответствии с графиком, приведенным на рис. 3.27.

В исследованных диапазонах обжатий по диаметру и относительной исходной толщине стенок скручивание трубы в круглом калибре конических вал-

ков практически остается постоянным. Удельный угол скручивания заготовки в зоне обжатия, приведенный на 1 мм длины очага деформации, составил $\varphi = 4,5 \pm 0,6$ град/мм, а остаточный удельный угол скручивания трубы – $\gamma = 0,6 \pm 0,2$ град/мм.

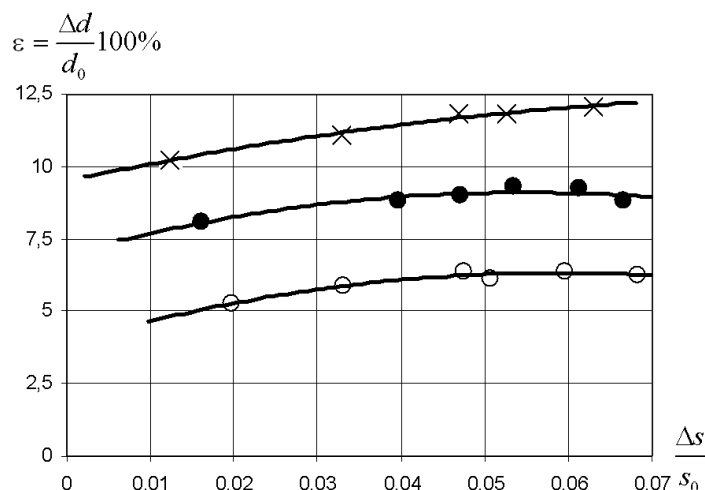


Рис. 3.27. Обжатия по диаметру трубы, обеспечивающие заданное относительное утолщение стенки: ○ – $\bar{D}/d_0 = 4,52$; ● – $\bar{D}/d_0 = 4,35$; × – $\bar{D}/d_0 = 4,20$

3.4. Выводы

1. Спроектирована и изготовлена экспериментальная четырехвалковая полноприводная клеть, позволяющая осуществлять опытную прокатку прутков и труб по схемам круг–квадрат, квадрат–круг, квадрат–квадрат и круг–круг.
2. Создана и использована при проведении опытных прокаток автоматизированная система сбора, обработки и хранения экспериментальной информации с оригинальным программным обеспечением, пригодная для анализа как кинематических, так и энергосиловых параметров прокатки в четырехвалковых калибрах конических валков.
3. Получены эмпирические зависимости для вытяжек, катающих диаметров, степени заполнения калибров, удельных углов скручивания и силовых параметров прокатки прутков по схемам круг–квадрат и квадрат–круг.
4. Для случая прокатки труб в круглом калибре без натяжений установлены закономерности и даны количественные оценки изменения относительного утолщения стенки; определены катающие диаметры и удельные углы скручивания труб при прокатке в калибрах конических валков.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ КОНИЧЕСКИХ ВАЛКОВ

4.1. Анализ кинематических и силовых параметров прокатки прутков по схеме круг–квадрат–круг в калибрах конических валков

Для теоретического анализа процесса четырехвалковой прокатки по схеме круг–квадрат приняты следующие допущения и гипотезы:

- сопротивление деформации принимается постоянным в очаге деформации и равным среднему значению, соответствующему средним степени и скорости деформации; деформационный разогрев и потери выделившегося тепла теплопроводностью через валки не учитываются; σ_s принимается при температуре 20⁰С;

- контактное трение постоянно на всех контактных поверхностях и определено законом Зибеля $\tau = \psi \tau_s$, где ψ – коэффициент трения; τ_s – среднее значение сопротивления деформации сдвига; зоны прилипания на контакте отсутствуют;

- внеконтактная деформация на входе и выходе очага деформации не учитывается;

- форма границы контактной поверхности на конических валках принята параболической и симметричной относительно оси прокатки;

- изменение диаметра описанной вокруг поперечного сечения полосы в зоне обжатия описывается линейной функцией, а интенсивность этого изменения в зависимости от вытяжки получена экспериментально при прокатке с высоким коэффициентом трения (обезжиренная замеленная поверхность образца и обезжиренные рабочие поверхности валков);

- на контактных поверхностях выделяются зоны опережения и отставания, разделенные нейтральной (критической) линией, все точки полосы на этой

линии имеют скорости, равные окружным скоростям валков в соответствующих точках рабочих поверхностей валков;

- под катающим диаметром валка $D_k = 2R_k$ понимается диаметр, окружная скорость точек на котором совпадает со скоростью выхода полосы из валков;

- мощность прокатки представлена суммой мощности внутренних сил (мощности деформации) и мощности продольной составляющей трения в зоне опережения;

- угол скручивания полосы в зоне обжатия определен условным поворотом критической линии, при котором достигается равенство моментов кручения от напряжений трения в зонах опережения и отставания;

- скручивание полосы локализуется лишь в зоне обжатия и не распространяется на выходящую из валков часть полосы;

- к выходящему концу полосы не прикладывается внешний крутящий момент, препятствующий или способствующий скручиванию полосы;

- прокатка осуществляется без напряжений и осевых подпоров;

- условие захвата полосы валками не анализируется.

Расчетная схема зоны обжатия круглой полосы в квадратном многовалковом калибре приведена на рис. 4.1.

Заготовка диаметром сечения d_0 прокатывается в замкнутом квадратном калибре со стороной a . Поскольку в общем случае калибр оказывается незаполненным, ширина контакта на выходе задана величиной b . Граница проекции контактной поверхности на координатную плоскость (x - y) задана функцией $y_k(x)$, а критическая линия – функцией $y_f(x)$.

Функция $y_k(x)$ может быть представлена параболой $x = \frac{4l}{b^2} y^2$, где l – длина очага деформации, представляемая выражением $l = \sqrt{(d_0 - a) \bar{R}}$;

$\bar{R} = R - \frac{a}{2\sqrt{2}}$ – средний радиус валка в калибре.

Отсюда следует $y = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{x}{l}}$ и $b_x = b \sqrt{\frac{x}{l}}$ – текущая ширина контакта.

На рис. 4.1 изображена принимаемая в расчете форма поперечного сечения полосы на выходе из валков. Здесь d_1 – диаметр описанной вокруг сечения полосы окружности. Форма свободной поверхности считается цилиндрической и определяется радиусом $d_1/2$.

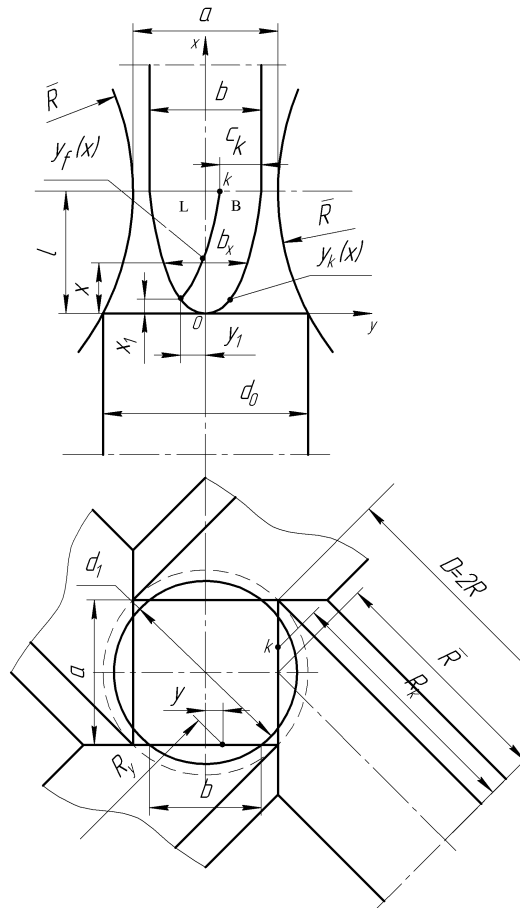


Рис. 4.1. Расчетная схема очага деформации при прокатке по схеме круг–квадрат

Площадь поперечного сечения прокатанной полосы $S_1 = ab + \frac{\beta}{2} d_1^2$, где

$\beta = \frac{\pi}{2} - 2\alpha$; $\alpha = \arctg \frac{b}{a}$, рад, в соответствии с рис. 4.2.

Вытяжка при прокатке по рассматриваемой схеме круг–квадрат

$$\lambda = \frac{\pi d_0^2}{4 \left(ab + \frac{\beta}{2} d_1^2 \right)}, \quad (4.1)$$

а степень деформации в логарифмическом представлении $\varepsilon = \ln \lambda$.

Диаметр описанной окружности d_1 при заданных исходных размерах полосы и калибра определяется из равенства вытяжек, определяемых из геометрических соотношений в соответствии с рис. 3.18, а и из опытных данных по величине степени заполнения калибра $\delta = \frac{d_1}{a\sqrt{2}}$, представленной в зависимости от λ на рис. 4.2.

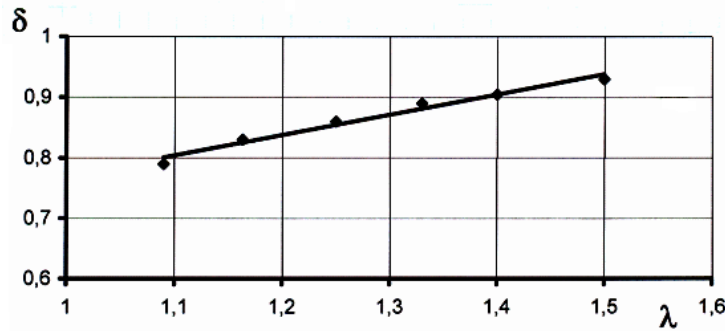


Рис. 4.2. Опытная зависимость степени заполнения калибра от вытяжки при относительном диаметре валков $A = 2\bar{R}/a = 6,5$

Опытная зависимость δ от λ аппроксимирована методом наименьших квадратов линейной функцией $\delta = 0,435 + 0,335\lambda$ при квадрате смешанной корреляции $R^2 = 0,976$.

Из аппроксимирующей функции можно записать выражение для приближительного расчета вытяжки

$$\lambda \cong 2,1 \frac{d_1}{a} - 1,3. \quad (4.2)$$

Диаметр d_1 определяется численно из выражения

$$\frac{\pi d_0^2}{4 \left[a \sqrt{d_1^2 - a^2} + \left(\frac{\pi}{4} - \arctg \frac{\sqrt{d_1^2 - a^2}}{a} \right) d_1^2 \right]} = 2,1 \frac{d_1}{a} - 1,3,$$

например, графически, как это показано на рис. 4.3 для случая прокатки: $d_0 = 25$ мм; $a = 18$ мм; $A = 6,5$.

Изменение диаметра описанной окружности вокруг текущего сечения полосы в зоне обжатия представлено в виде

$$d_x = d_0 - \frac{x}{l}(d_0 - d_1).$$

В этом случае площадь текущего поперечного сечения

$$S_x = ab\sqrt{\frac{x}{l}} + \frac{\beta_x}{2}d_x^2, \text{ где } \beta_x = \frac{\pi}{2} - 2\alpha_x; \alpha_x = \arctg \frac{b_x}{a} = \arctg \left(\frac{b}{a} \sqrt{\frac{x}{l}} \right).$$

Здесь $\beta_{x|x=l} = \beta$ и $\alpha_{x|x=l} = \alpha$ в соответствии с рис. 3.18, а.

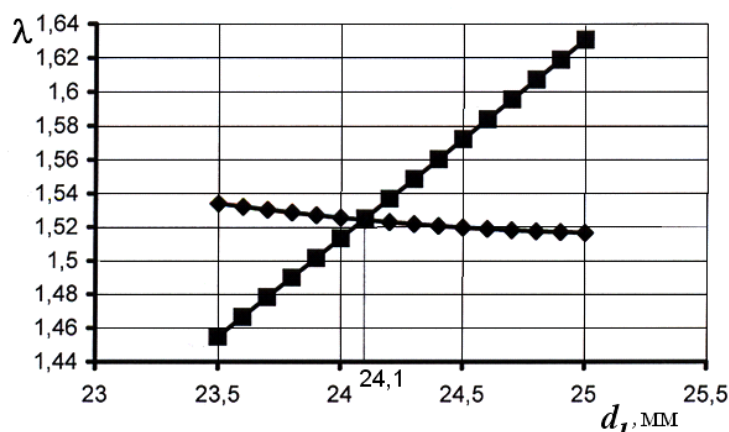


Рис. 4.3. К процедуре определения d_1 графическим способом:

◆ – уравнение (4.1); ■ – уравнение (4.2)

Катающий диаметр является важным параметром прокатки, знание которого необходимо для скоростной настройки непрерывных групп клетей и блоков. Величина катающего диаметра определяется положением точки k (см. рис. 4.1), заданным координатой $c_k = (R - R_k)\sqrt{2} - (a - b)/2$.

Из анализа опытных данных по положению критической линии на контактной поверхности установлена возможность ее аппроксимации уравнением

$$x = \frac{4l}{b^2} \cdot (y + c_k)^2. \quad (4.3)$$

Катающий диаметр может быть представлен безразмерным параметром

$$\eta_k = \frac{D_k - D_1}{D - D_1} = 1 - \frac{D - D_k}{a\sqrt{2}},$$

где $D_1 = D - \frac{2a}{\sqrt{2}}$ – минимальный диаметр валка в калибре.

В этом случае $c_k = a(1 - \eta_k) - (a - b)/2$. При $D_k = \bar{D}$ $\eta_k = 0,5$; при $D_k = D$ $\eta_k = 1$; при $D_k = D_1$ $\eta_k = 0$.

Проверка справедливости описания формы нейтральной линии, разделяющей зоны опережения и отставания, уравнением параболы (4.3), смещенной на величину c , осуществляется численным методом по условию совпадения продольных составляющих скоростей полосы и валков. В точках нейтральной линии скорости в направлении прокатки полосы и валков совпадают. При численном анализе катающий диаметр принимался равным среднему $D_k = \bar{D}$ и $c_k = b/2$.

Если задана частота вращения валков n , об/мин, то окружная скорость валка на катающем диаметре равна

$$V'_1 = \frac{\pi \bar{D} n}{60} = \frac{\pi \bar{R} n}{30}.$$

Продольная составляющая окружной скорости валка и скорость полосы на выходе из очага деформации

$$V_1 = \frac{\sqrt{2} \pi \bar{R} n}{60}.$$

Условие постоянства секундных объемов $V_1 S_1 = V_x S_x$ позволяет определить продольную (вдоль направления прокатки) скорость сечения полосы, заданную координатой x :

$$V_x = V_1 \frac{S_1}{S_x}.$$

Окружная скорость валков в зоне обжатия зависит от координаты y и определяется выражением

$$V'_x = \frac{\pi n}{30} \left(R - \frac{a}{2\sqrt{2}} + \frac{a}{b\sqrt{2}} y \right) = \frac{\pi n}{30} \left[R - \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,5 - \frac{y}{b} \right) \right],$$

а продольная составляющая этой скорости

$$V = \frac{\sqrt{2} n \pi}{60} \left[R - \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,5 - \frac{y}{b} \right) \right].$$

Касательная к рабочей поверхности вала составляющая скорости движения точек поверхности полосы $V_M = V_x / \cos \alpha_x$, где $\alpha_x = \arcsin \frac{l-x}{R_y}$;

$$R_y = \bar{R} + \frac{y}{\sqrt{2}} = R - \frac{a}{2\sqrt{2}} + \frac{y}{\sqrt{2}}.$$

Координаты точек нейтральной линии на контактной поверхности находятся численно из уравнения $V = V_M$. Примеры построения функции $y_f(x)$ для случая прокатки с вытяжкой $\lambda = 1,52$ на валах диаметром $D = 130$ и 100 мм приведены на рис. 4.4. При расчетах принято равенство катающего и среднего диаметров валков ($\eta_k = 0,5$). В случае $D_k \neq \bar{D}$ график функции $y_f(x)$ смещается параллельно себе, при этом $y_f(x)|_{x=l} = b/2 - c_k$.

Критическая линия $y_f(x)$, в дальнейшем представляемая смещенной параболой

$$y_f = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{x}{l}} - (R - R_k) \sqrt{2} + \frac{a-b}{2},$$

разделяет контактную поверхность заготовки с каждым из валков на зону отставания B (рис. 4.4) и зону опережения L , на которых действуют напряжения трения τ , противоположные скоростям скольжения. Угол отклонения векторов τ от вектора скорости движения полосы V равен углу конусности валков и в данном случае равен 45° . На рис. 4.4 показаны напряжения, приложенные к заготовке со стороны валков. Процесс прокатки осуществляется за счет составляющей трения τ_x в зоне отставания. Трение τ_x в зоне опережения препятствует входу полосы в валки. Компонента трения τ_y в зоне B создает крутящий момент, способствующий скручиванию заготовки в очаге деформации, поскольку векторы τ_y во всех четырех зонах отставания создают однонаправленный крутящий момент, благодаря использованной схеме сопряжения валков при формировании калибра.

Из уравнения $V = V_m$ невозможно определить катающий диаметр валков, то есть положение точки k на рис. 4.1. Поэтому использована процедура определения энергосиловых параметров прокатки. Полная мощность прокатки N_1

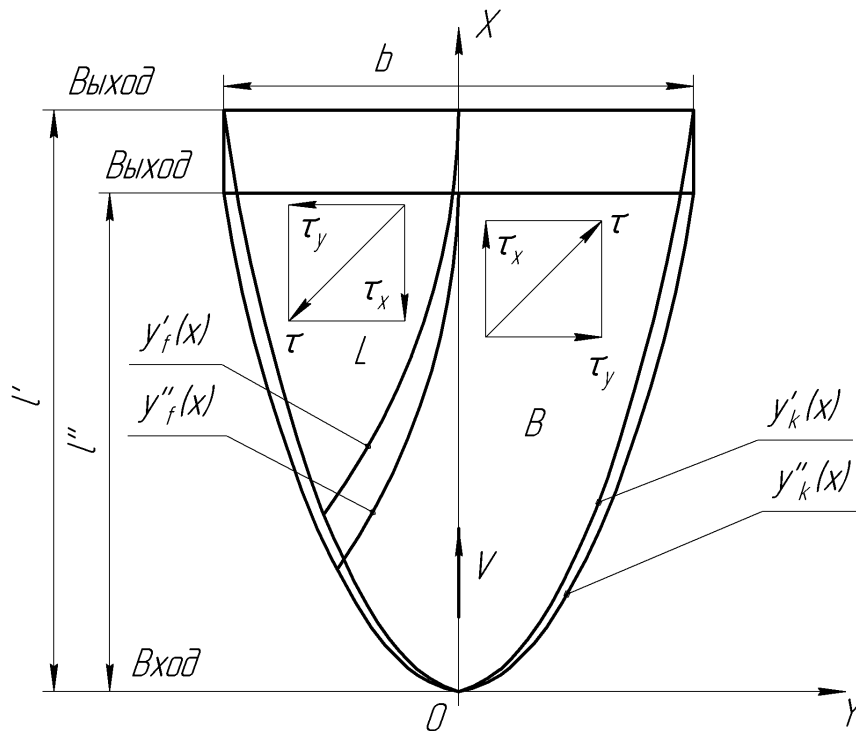


Рис. 4.4. Положение критической линии на контактной поверхности вала при прокатке по схеме круг–квадрат: параметры с индексом (') соответствуют случаю прокатки: $R = 65$ мм; $d_0 = 25$ мм; $a = 18$ мм; с индексом (") – $R = 50$ мм; $d_0 = 25$ мм; $a = 18$ мм

может быть найдена как произведение момента продольной составляющей сил трения в зонах отставания на угловую скорость валков. С другой стороны, полная мощность прокатки определяется суммированием мощностей внутренних сил $N_{\text{вн}}$ и сил трения в зоне опережения $N_{\text{тр}}$, то есть $N_2 = N_{\text{вн}} + N_{\text{тр}}$. Из условия равенства $N_1 = N_2$ численным методом определяется катающий диаметр в рамках допущения, что критическая линия при любом смещении D_k от \bar{D} остается параболической. В численной процедуре определения D_k осуществлялся поиск величины η , при которой выполняется равенство $N_1 = N_2$. Зная параметр η , катающий диаметр можно найти по формуле $D_k = D - \sqrt{2}a(1 - \eta_k)$.

Первое приближение параметра η_k находилось из априорной информации. Возможности экспериментальной установки ограничивались варьировани-

ем вытяжки, поэтому приближение по η_k находилось из функции $\eta_k = \eta_k(\lambda)$, определенной лишь при относительном диаметре валка $A = 6,5$.

Эмпирическая зависимость $\eta_k = \eta_k(\lambda)$ аппроксимирована полиномом

$$\eta_k = 10,97\lambda^3 - 47,74\lambda^2 + 17,60 - 30,78.$$

Область интегрирования зоны отставания разделена сечением, заданным точкой пересечения x_1 кривых $y_k(x)$ и $y_f(x)$ (см. рис. 4.1 или 4.4):

$$x_1 = \frac{4 \cdot l}{b^2} y_1^2, \text{ где } y_1 = \frac{a-b}{4} - (R - R_k) \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Момент прокатки, создаваемый силами трения в зоне отставания, представлен выражением:

$$M_{\text{пр}} = 2\sqrt{2}\psi\tau_s \left(\int_0^{x_1} \int_{-y_k}^{y_k} R_y \cos \gamma_x dy dx + \int_{x_1}^l \int_{y_f}^{y_k} R_y \cos \gamma_x dy dx - \int_{x_1}^l \int_{-y_k}^{y_f} R_y \cos \gamma_x dy dx \right),$$

где $\gamma_x = \arcsin \frac{l-x}{R_y}$; $R_y = \bar{R} + \frac{y}{\sqrt{2}}$; $y_f = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{x}{l}} - a(1-\eta_k) + \frac{a-b}{2}$; $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ – сопро-

тивление деформации сдвига при температурно-скоростных условиях прокатки.

При нахождении σ_s в условиях горячей деформации принимается средняя за процесс температура прокатки (при прокатке свинцовых полос принимается $t = 20^\circ\text{C}$ и деформационный разогрев, и потери тепла не учитываются); степень деформации оценивается величиной $\varepsilon = \ln \lambda$, а скорость деформации принимается средней в зоне обжатия $\xi = \varepsilon/\tau_0$, где τ_0 – время перехода матери-

альных частиц металла полосы от входа до выхода из зоны обжатия $\tau_0 = \int_0^l \frac{dx}{V_x}$.

$$\text{Здесь } V_x = V_1 \frac{S_1}{S_x}, \quad V_1 = \frac{\sqrt{2}\pi R_k n}{60}.$$

Поскольку до нахождения величины η_k R_k неизвестен, следовательно, V_1 может быть найдена последовательными приближениями, первые из которых находятся при $R_k = \bar{R}$.

Мощность прокатки $N_1 = M_{\text{пр}} \omega$, где $\omega = \pi n / 30$ – угловая скорость валков. Мощность прокатки N_2 , представляемая как сумма $N_{\text{вн}}$ и $N_{\text{тр}}$ в зоне опережения, в случае усреднения параметров по очагу деформации записывается следующим образом:

$$N_2 = N_{\text{вн}} + N_{\text{тр}} = \int_v HT dv + 4\psi\tau_s \left(\int_0^{x_1} \int_{-y_k}^{y_k} V_g dy dx + \int_{x_1-y_f}^l \int_{-y_k}^{y_k} V_g dy dx + \int_{x_1-y_k}^l \int_{-y_f}^{y_f} V_g dy dx \right),$$

где $V_g = |V - V_i|$ – абсолютная величина скорости контактного скольжения.

Интенсивность скоростей деформаций сдвига H оценивается величиной $\sqrt{3} \cdot \xi$, а интенсивность касательных напряжений по условию текучести Мизеса $T = \tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}$. Объемный интеграл в этом случае заменяется объемом, определяемым численно из выражения

$$v = \int_0^l \left[ab \sqrt{\frac{x}{l}} + \left(\frac{\pi}{4} - \arctg \frac{b}{a} \sqrt{\frac{x}{l}} \right) d_x^2 \right] dx, \text{ где } d_x = d_0 - \frac{x}{l}(d_0 - d_1).$$

Таким образом, $N_2 = v \xi \sigma_s$.

Из уравнения $N_1 = N_2$ установлены значения относительного катающего диаметра η_k в зависимости от вытяжки λ , коэффициента трения ψ (по Зибелю) и относительного диаметра валков A . Численный анализ выполнен в системе Maple (лицензия филиала УГТУ–УПИ в г. В. Салда). Расчетные значения η_k представлены графически на рис. 4.5.

Определены удельные скорости деформации ξ' , с^{-1} приведенные к частоте вращения валков $n = 1$ об/мин. В конкретном случае прокатки при заданной вытяжке и частоте вращения $\xi = \xi' n$. Это значение используется при определении сопротивления металла деформации при горячей прокатке. Результаты расчета ξ' показаны на рис. 4.6.

Для определения мощности прокатки в реальном процессе рассчитана безразмерная удельная мощность, которая при расчете умножается на частоту

вращения валков (об/мин), сопротивление металла деформации (МПа), на средний диаметр валка (м) и на среднюю площадь сечения заготовки (м²).

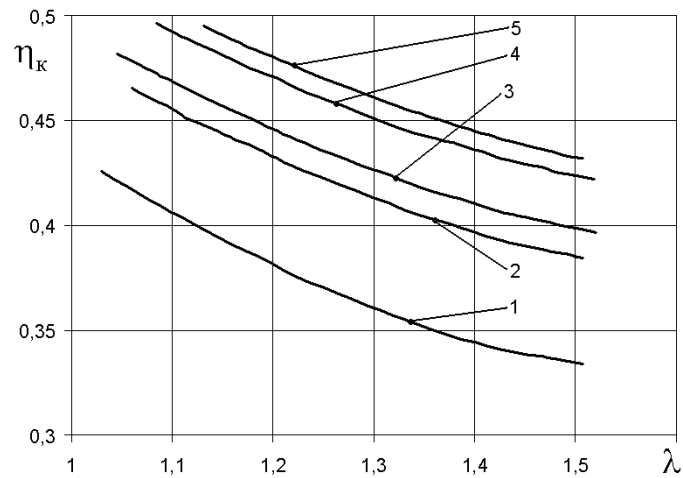


Рис. 4.5. Относительный катающий диаметр при прокатке по схеме круг–квадрат: 1 – $A = 6,5$; $\psi = 0,4$; 2 – $A = 4,8$; $\psi = 0,6$; 3 – $A = 6,5$; $\psi = 0,6$; 4 – $A = 10,4$; $\psi = 0,6$; 5 – $A = 6,5$; $\psi = 0,8$

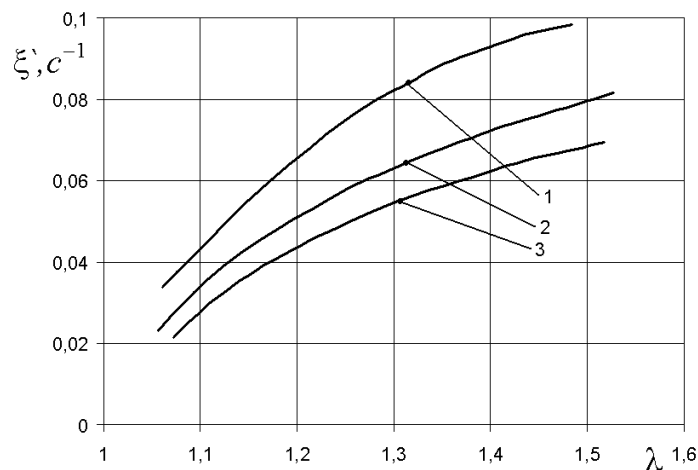


Рис. 4.6. Удельная (на 1 об/мин) скорость деформации при прокатке по схеме круг–квадрат: 1 – $A = 10,4$; 2 – $A = 6,5$; 3 – $A = 4,8$

$$\bar{N} = \frac{N}{n \sigma_s \bar{D} S_{\text{ср}}}.$$

Зависимость \bar{N} от λ , A и ψ приведена на рис. 4.7.

После определения момента прокатки $M_{\text{пр}}$ при выполнении условия $N_1 = N_2$ расчет полного давления металла на валки проведен с допущением, что центр приложения равнодействующей полного давления совмещен с центром тяжести контактной поверхности, координаты которого в выбранной си-

стеме координат равны: $y_0 = 0$; $x_0 = l \cdot \sqrt[3]{1/4} \cong 0,63l$. Коэффициент плеча приложения равнодействующей полного давления металла на валки $\psi_l = (l - x_0)/l \cong 0,37$.

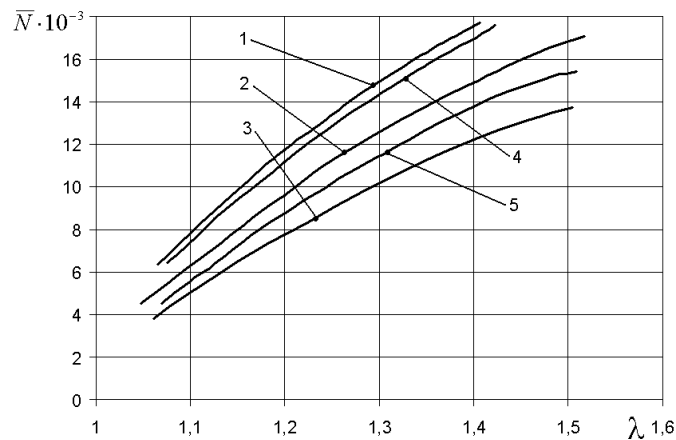


Рис. 4.7. Удельная мощность прокатки по схеме круг–квадрат:
 1 – $A = 6,5$, $\psi = 0,8$; 2 – $A = 6,5$, $\psi = 0,6$; 3 – $A = 6,5$, $\psi = 0,4$; 4 – $A = 10,4$, $\psi = 0,6$;
 5 – $A = 4,8$, $\psi = 0,6$

Полное давление металла на валки (усилие прокатки) $P = \frac{M_{\text{пр}}}{l \psi_l}$, а его радиаль-

ная составляющая $P_r = \frac{\sqrt{2}}{2} P \cong \frac{2,7 M_{\text{пр}}}{\sqrt{(d_0 - a) \left(D - \frac{a}{\sqrt{2}} \right)}}$. Если считать, что уравнение

параболы удовлетворительно представляет контур контактной поверхности, то проекция площади на плоскость прокатки определяется выражением $F_k = \frac{2}{3} b l$,

что дает возможность определить среднее контактное давление $p = P/F_k$, представимое в безразмерной форме как коэффициент напряженного состояния $n_\sigma = p/\sigma_s$, показанный на рис. 4.8 в зависимости от вытяжки λ , относительно-го диаметра валка A и коэффициента трения ψ . Кривые построены для случая прокатки свинцовых полос. Сопротивление деформации σ_s свинца определено по ранее приведенным зависимостям и графикам при расчетных значениях степени ε и скорости деформации ξ .

При проектировании технологии прокатки и в частности при расчете энергосиловых параметров удобно использовать безразмерное соотношение

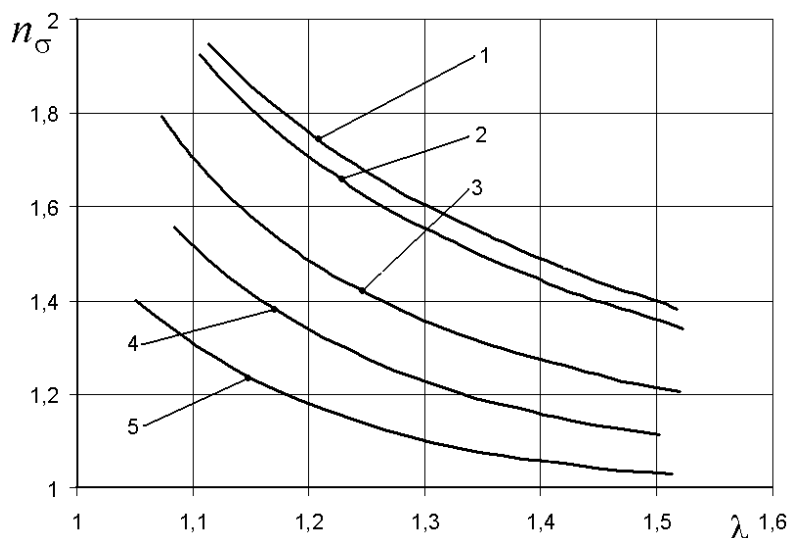


Рис. 4.8. Коэффициент напряженного состояния при прокатке по схеме круг–квадрат:
 1 – $A = 6,5$, $\psi = 0,8$; 2 – $A = 10,4$, $\psi = 0,6$; 3 – $A = 6,5$, $\psi = 0,6$;
 4 – $A = 4,8$, $\psi = 0,6$; 5 – $A = 4,8$, $\psi = 0,4$

силовых параметров $m = P \bar{D} / M_{np}$, которое зависит от вытяжки и диаметра валков, но практически инвариантно по отношению к контактным условиям трения. Графики зависимости m от λ и A , построенные по расчетным данным, приведены на рис. 4.9.

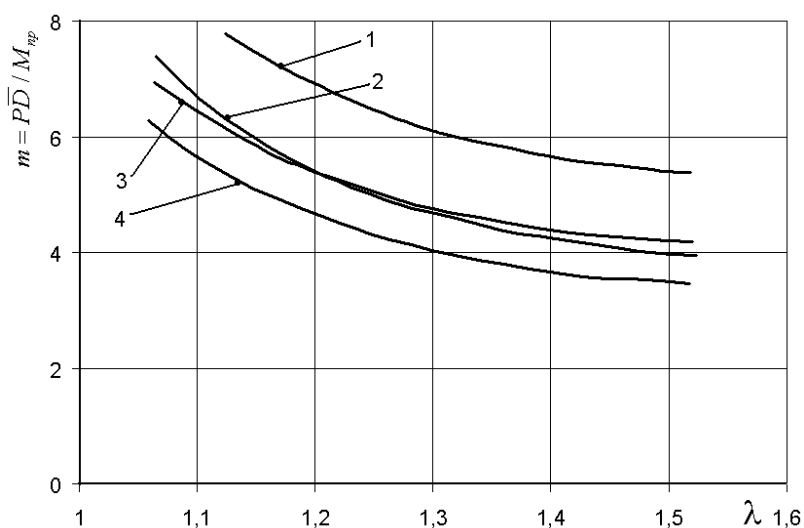


Рис. 4.9. Безразмерное соотношение силовых параметров прокатки по схеме круг–квадрат:
 1 – $A = 10,4$, $\psi = 0,6$; 2 – $A = 6,5$, $\psi = 0,8$; 3 – $A = 6,5$, $\psi = 0,6 \dots 0,4$; 4 – $A = 4,8$, $\psi = 0,6$

Независимость m от ψ подтверждается экспериментами по прокатке свинцовых полос в технически допустимом диапазоне изменения контактных условий трения.

Определение положения и формы критической линии на контактной поверхности позволяет найти суммарный крутящий момент, создаваемый поперечной составляющей сил трения в зоне обжатия

$$M_k = 2\sqrt{2}\psi\tau_s \left(\int_0^{x_1} \int_{-y_k}^{y_k} h_x dy dx + \int_{x_1}^l \int_{y_f}^{y_k} h_x dy dx - \int_{x_1}^l \int_{-y_k}^{y_f} h_x dy dx \right),$$

где $h_x = a + 2\bar{R}(1 - \cos\alpha)$; $\alpha = \arcsin \frac{l-x}{R}$.

Вследствие ограниченного промышленного применения полноприводных четырехвалковых клетей процесс обжатия в четырехвалковых калибрах по схемам круг–квадрат, квадрат–квадрат и квадрат–круг остается малоизученным. Еще меньше сведений в современной литературе о прокатке в многовалковых калибрах, образованных коническими валками. Главной особенностью этой прокатки следует считать осевое скручивание полос, проявляющееся в первую очередь в схеме круг–квадрат. Скручивание естественно возможно, но технически недопустимо и при прокатке по двум другим схемам. Круглая в сечении заготовка скручивается интенсивно даже при непрерывной прокатке, но в меньшей степени, чем при последовательной.

При входе квадратной полосы в квадратный или круглый калибр ее легко удержать от кручения с помощью предыдущего квадратного калибра и проводкового устройства. Кручение входящего конца квадратной полосы не допустимо из-за периодического совмещения ребер полосы с зазорами и образования заусенцев даже при использовании замкнутых калибров, изображенных на рис. 2.14. Последовательная прокатка в последовательности пар калибров квадрат–круг обеспечивает значительное скручивание, при котором уже проявляется влияние на свойства проката винтовой (спиральной) текстуры.

Кинематика процесса прокатки в конических валках до настоящего времени не изучалась. В этом плане можно сослаться на работу [60], где приводит-

ся вывод формулы для расчета крутящего момента, возникающего из осевой асимметрии трения в круглом двухвалковом калибре, нарезанной на конических бочках валков (рис. 1.21). Исходя из полученных формул, нельзя объяснить возникновение упруго-пластического кручения только за счет момента сил трения. Известно, что для осуществления предельного упругого закручивания круглого в сечении прутка необходим крутящий момент не менее

$$M_y = \frac{\pi}{2} \tau_s \cdot r_0^3 = \frac{\pi \tau_s d_0^3}{16},$$

где $d_0 = 2r_0$ – диаметр сечения прутка; τ_s – сопротивление материала прутка сдвиговой деформации.

Пластическое кручение, при котором тангенциальное напряжение сдвига $\tau = \tau_s$ достигается при $M_{\pi} = \pi \tau_s d_0^3 / 12$.

Чтобы не допустить упругопластического кручения полосы на входе в валки, необходимо создать условия прокатки, при которых $M_k < M_y$. На рис. 4.10 возникающий крутящий момент представлен в безразмерном виде отношением M_k / M_y .

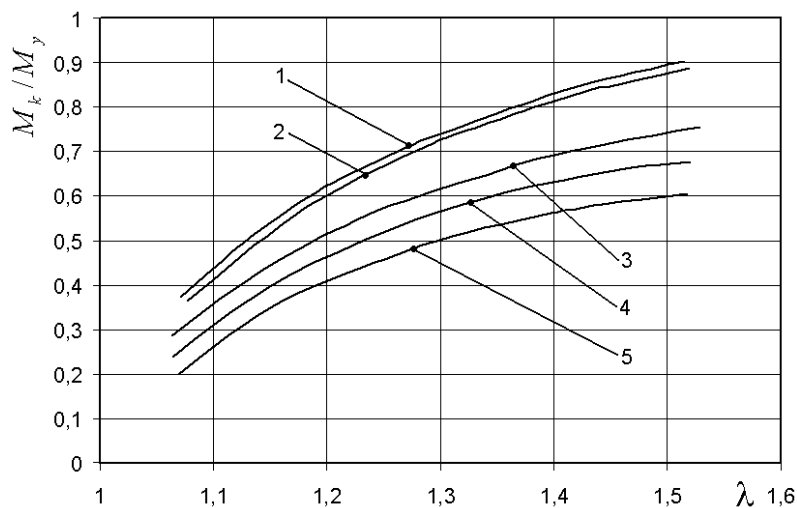


Рис. 4.10. Относительный крутящий момент при прокатке на конических валках по схеме круг–квадрат: 1 – $A = 6,5$, $\psi = 0,8$; 2 – $A = 10,4$, $\psi = 0,6$; 3 – $A = 6,5$, $\psi = 0,6$; 4 – $A = 4,8$, $\psi = 0,6$; 5 – $A = 6,5$, $\psi = 0,4$

Из приведенных графиков следует, что в диапазоне изменения коэффициента трения ψ (по Зибелю) от 0,4 до 0,8 и относительного диаметра валков A от 4,8

до 10,4 возникающий в результате действия поперечной составляющей контактных сил трения крутящий момент не вызывает упругопластического кручения полосы на входе в клеть.

Упругопластическое, или даже почти пластическое кручение входящей полосы за счет момента сил трения возможно при больших вытяжках ($\lambda > 1,7$), больших значениях относительного диаметра валков ($A > 15$) и высоких коэффициентах трения. Таким образом, в реальных условиях прокатки только за счет трения даже при достаточно большом значении коэффициента трения невозможно обеспечить достаточный уровень крутящего момента. Следовательно, переход металла в пластическое состояние при скручивании происходит не только за счет трения, а также благодаря самой форме очага деформации, то есть благодаря изменению диаметра каждого валка по ширине калибра.

Расчет угла скручивания круглого в сечении профиля, прокатываемого в четырехвалковом калибре, образованном коническими валками, проводится в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 4.11.

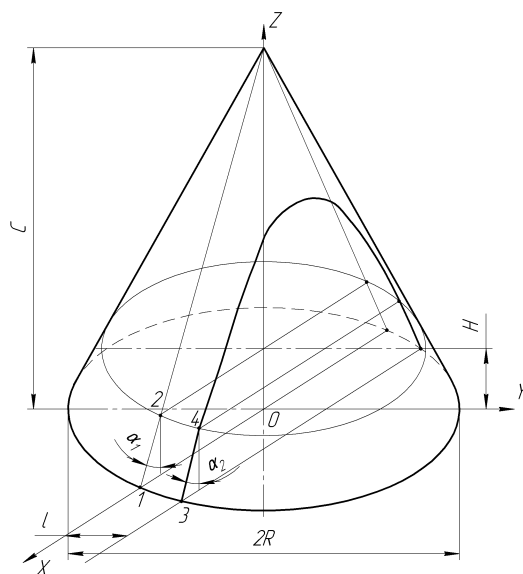


Рис. 4.11. Расчетная схема угла скручивания полосы

Рабочая поверхность валка представляет часть боковой поверхности прямого корпуса, опирающегося на основание радиусом R , принимаемым за расчетный. Наименьший радиус конического валка в зоне обжатия определен плоскостью, перпендикулярной оси валка и отстоящей от основания на рас-

стоянии H . Если образующая конической поверхности наклонена под углом 45° к оси, то $H = a / \sqrt{2}$, где a – ширина калибра. Высота конуса C в этом случае равна расчетному радиусу валка, т.е. $C = R$. Коническая поверхность условно разрезана двумя плоскостями: диаметральной осевой и ей параллельной, отстоящей на расстоянии l , которое принимается равным длине зоны обжатия. Линиями пересечения этих плоскостей с поверхностью рабочей части валка являются отрезки 1-2 и 3-4. Считается, что отрезок 1-2 прямой и лежит в плоскости выхода полосы из калибра. Отрезок, определяющий положение входного сечения, при большой величине l приобретает существенную кривизну. Поскольку при реальной прокатке l значительно меньше R , то отрезок 3-4 рассматривается как прямой, проведенный через точки пересечения смещенной на длину l плоскости с окружностями оснований усеченного конуса валка. Положение отрезков 1-2 и 3-4 задано координатами (x, y, z) и углами наклона α_1 и α_2 , разность которых и определяет угол скручивания прутка на длине зоны обжатия l . В общем случае координаты точки 1 равны: $x = R$; $y = 0$; $z = 0$; точки 2: $x = R \left(1 - \frac{H}{c}\right)$; $y = 0$; $z = H$. Отсюда $\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{R}{c}$; при $R = c$ $\alpha_1 = 45^\circ$.

Координаты точки 3: $y = l$; $z = 0$. Координата x точки 3 определяется из выражения $\frac{l^2 + x^2}{R^2} = 1$. Отсюда $x = \sqrt{R^2 - l^2}$.

Для точки 4: $y = l$, $z = H$, $x = \sqrt{R^2 \left(1 - 2\frac{H}{c} + \frac{H^2}{c^2}\right) - l^2}$. Координата x опре-

делена из уравнения конуса.

$$\text{Отсюда } \alpha_2 = \arctg \left[\frac{\sqrt{R^2 - l^2} - \sqrt{R^2 \left(1 - 2\frac{H}{c} + \frac{H^2}{c^2}\right) - l^2}}{H} \right].$$

При $c = R$ $\alpha_2 = \arctg \left[\frac{\sqrt{R^2 - l^2} - \sqrt{(R - H)^2 - l^2}}{H} \right]$.

Если проводится прокатка квадратного профиля со стороной a из круглой заготовки диаметром d_0 , то абсолютное обжатие $\Delta h = d_0 - a$, а длина очага деформации (максимальная) $l = \sqrt{\Delta h \cdot \bar{R}}$, где $\bar{R} = R - \frac{a}{\sqrt{2}}$ – средний радиус конического валка в зоне обжатия.

Угол скручивания полосы на длине очага деформации $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ в наибольшей степени зависит от относительного диаметра валка $A = 2\bar{R}/a$ и в существенно меньшей от вытяжки за проход $\lambda = S_0/S_1$, где S_0 и S_1 – площади сечения полосы соответственно на входе и выходе из зоны обжатия. В качестве примера на рис. 4.12 приведена зависимость $\Delta\alpha$, град от A при вытяжке $\lambda = 1,5$.

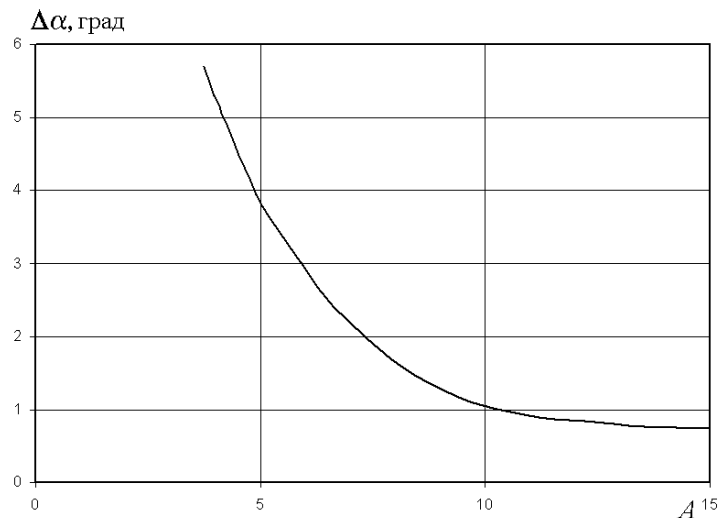


Рис. 4.12. Характер влияния относительного диаметра валков на угол скручивания полосы в зоне обжатия при прокатке по схеме круг–квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,5$

Средняя в зоне обжатия сдвиговая деформация может быть без больших погрешностей определена выражением

$$\bar{\gamma} = \frac{\pi}{360} \cdot \frac{\Delta\alpha d_{\text{эк}}}{l},$$

где $d_{\text{эк}} = 2\sqrt{\frac{\bar{S}}{\pi}} \approx 1,31\sqrt{\bar{S}}$ – средний эквивалентный диаметр полосы;
 $\bar{S} = (S_0 + S_1)/2$.

Если деформация кручения остается упругой в сечении заготовки радиусом $r_0 = d_0/2$, то сдвиговая деформация $\bar{\gamma}$ порождает тангенциальные касательные напряжения

$$\tau = \frac{\bar{\gamma} E}{2(1+\nu)},$$

где E – модуль упругости первого рода; ν – коэффициент Пуассона.

На входе в очаг деформации сдвиговая деформация $\gamma_0 = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\Delta\alpha r_0}{l}$.

Если $\frac{\gamma_0 E}{2(1+\nu)} > \tau_s$, где τ_s – сопротивление сдвиговой деформации прокатываемого материала, то реализуется упруго-пластическая деформация при кручении.

Сдвиговая деформация на границе упругой и пластической зон в этом случае $\gamma_y = \frac{2\tau_s(1+\nu)}{E} = \frac{\Delta\alpha r_y}{l}$, где r_y – радиус кольцевой границы упругой и пластической зон. В упругой зоне касательное напряжение распределено линейно по радиусу сечения $\tau = \tau_s \cdot r/r_y$, а в пластической – $\tau = \tau_s$. Крутящий момент при упруго-пластическом кручении $M = \frac{2}{3} \pi \tau_s \left(r_0^3 - \frac{1}{4} r_y^3 \right)$. Этот крутящий момент, возникающий при скручивании входящей полосы, уравновешен контактными давлениями в зоне обжатия.

Опыт прокатки на уже созданных прокатных установках с многовалковыми калибрами, образованными коническими валками, показывает, что реальное скручивание полосы, в частности при прокатке по схеме круг–квадрат, существенно больше, чем представленное на рис. 4.12.

В случае последовательной прокатки и, следовательно, без заневоливания входящего конца полосы, возникает скручивание, существенно превышающее

величину $\Delta\alpha$, связанную с кручением за счет формы очага деформации, образованного коническими валками. Интенсивное кручение свободно входящего конца полосы наблюдается даже при малых обжатиях, когда крутящий момент от поперечных сил контактного трения явно не достаточен для упругопластического скручивания полос. Поскольку кинематическое, независимое от трения, упругопластическое кручение переводит, по крайней мере, периферийную часть металла сечения заготовки в пластическое состояние, дополнительно приложенный крутящий момент от сил трения значительно увеличивает общий угол скручивания полосы. Свободное кручение полосы на входе меняет кинематику течения металла и, очевидно, влияет на величину катающего диаметра, а также на положение, а возможно и форму критической линии на контактной поверхности.

Упрощенная описанная аналитическая модель очага деформации при прокатке на конических валках по схеме круг-квадрат не позволяет определить реальные углы скручивания полосы в зоне обжатия.

В случае заневоливания переднего конца полосы угол скручивания в зоне обжатия представлен суммой $\phi = \varphi + \gamma$, где φ – угол скручивания полосы в зоне обжатия при свободном переднем конце раската; γ – остаточный угол скручивания. Рост γ при уменьшении обжатия объясняется смятием контактной зоны при ее малой ширине $b = \sqrt{d_1^2 - a^2}$ под действием возникающего в очаге деформации крутящего момента M_k . Хотя угол остаточного скручивания сравнительно мал, особенно в диапазоне практически приемлемых вытяжек, его следует учитывать при установке проводковых устройств последующих клеток непрерывной группы. В случае применения квадратного калибра в качестве чистового выводные проводки должны быть рассчитаны на возможность раскручивания профиля с учетом упругого последействия, величина которого зависит от расстояния между плоскостями осей валков клетки и роликов раскручивающей проводки.

Аналитически удалось удовлетворительно описать функцию ϕ полного угла скручивания полосы в зоне обжатия и добиться приемлемого для практики совпадения с опытными данными с помощью искусственного приема условного разворота и смещения критической линии контактной поверхности до обнуления крутящего момента, то есть для удовлетворения равенству

$$\int_{0-y_k}^{x_1} \int_{y_k}^{y_f} h_x dy dx + \int_{x_1}^l \int_{y_f}^{y_k} h_x dy dx = \int_{x_1-y_k}^l \int_{y_k}^{y_f} h_x dy dx.$$

Результаты расчета в среде Maple удельного угла скручивания ϕ в зависимости от вытяжки и относительного диаметра валков представлены на рис. 4.13.

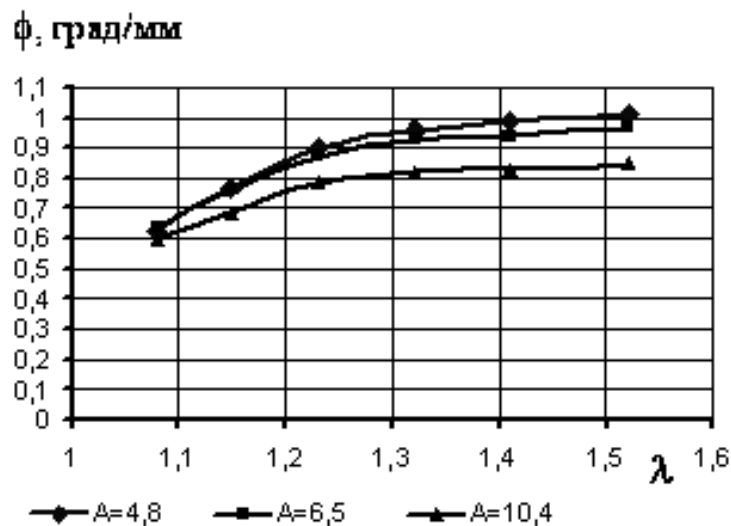


Рис.4.13. Удельный угол скручивания полосы в зоне обжатия

Располагая данными по величине удельного угла скручивания, легко определить угол скручивания профиля длиной L после прокатного прохода с вытяжкой λ :

$$\phi_{\pi} = \phi \cdot L \cdot \lambda, \text{ град; } L, \text{ мм.}$$

В этом случае деформация сдвига составит величину $\gamma_{\pi} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\phi_{\pi} d_{\text{ок}}}{L}$,

где $d_{\text{ок}}$ – диаметр окружности, вписанной в контур поперечного сечения профиля.

4.2. Постановка конечно-элементных моделей процессов прокатки в калибрах конических валков

Задача исследования напряженно-деформированного состояния профиля в процессе редукиционно-растяжной прокатки является контактной, упругопластической, нелинейной, требующей учета больших перемещений и деформаций. В настоящее время наиболее перспективным методом расчета подобных задач является метод конечных элементов. Лидером среди пакетов, позволяющих решать существенно нелинейные задачи методом конечных элементов с реалистическими математическими моделями материалов, является пакет LS-DYNA компании LSTC (Livermore Software Technology Corporation).

Более того, возможности этого пакета позволяют решать задачи как в квазистатической, так и в динамической постановке. LS-DYNA является, по существу, лишь решателем, данные для которого готовятся в других программных пакетах. То же самое можно сказать и об анализе результатов расчета (постпроцессинге). По-видимому, наиболее удачным в настоящий момент препроцессором является ANSYS/LS-DYNA, который по геометрической модели делает сетку конечных элементов, необходимую для упругопластических задач. Наиболее удобный и качественный постпроцессинг на сегодняшний день обеспечивает пакет LS-PREPOST.

В постановке и решении задач прокатки в многовалковых калибрах конических валков существует три типа нелинейности: геометрическая нелинейность из-за больших перемещений и скручивания профиля вдоль оси прокатки; физическая нелинейность из-за пластической постановки; контактная нелинейность из-за существования непостоянного контакта между рабочей частью валков и поверхностью прокатываемого профиля.

Нелинейные задачи решают явным (explicit) или неявным (implicit) методом. Неявный метод (реализован в ANSYS), безусловно, устойчив (не зависит от шага интегрирования), но решить с его помощью существенно нелинейные задачи обычно не удастся из-за проблем со сходимостью решения и большим

объемом вычислений. Поэтому такие задачи решают явным методом (реализован в LS-DYNA). Существенным недостатком явного метода является его условная устойчивость, то есть решение задачи не будет зависеть от шага по времени, только если он меньше определенного значения. Это значение определяется из критерия Куранта [108]:

$$\Delta t_{\max} = a \sqrt{\frac{\rho}{E}},$$

где a – характерный размер конечного элемента, ρ – плотность материала, E – модуль упругости материала. Поэтому пакет LS-DYNA сам определяет размер шага по времени так, чтобы критерий Куранта не нарушался. Однако размер шага по времени в этом случае оказывается очень мал, и рассчитать таким способом квазистатические задачи невозможно.

Поэтому используют два специальных приема [114] – увеличение скорости движения инструмента и/или увеличение плотности заготовки, пренебрегая при этом искусственно внесенными динамическими эффектами. Критерием того, что задача не динамическая, а статическая, является отношение кинетической энергии заготовки к ее внутренней энергии. Если это отношение не превосходит пяти процентов, то задача может считаться квазистатической [114].

Из практики решения подобных задач [114] известно, что примерно 1000 шагов интегрирования на один миллиметр продвижения инструмента достаточно для получения адекватного решения. Потому рекомендуется увеличить скорость движения инструмента, и выбрать такой шаг по времени, чтобы обеспечить 1000 шагов интегрирования на один миллиметр продвижения инструмента.

Для анализа кинетики упругопластического деформирования заготовки были построены геометрические модели заготовки и модели конических грибовидных валков для четырехвалковой прокатки в CAD – пакете Компас 3D LT. Далее геометрическая модель была импортирована в CAE ANSYS для построения конечно-элементной модели и задания необходимых условий нагружения и контрольных карт. Поскольку препроцессор ANSYS на сегодняшний день не

позволяет задавать все опции, имеющиеся в пакете LS-DYNA, то обычно требуется дополнительная ручная правка генерированного keyword-файла.

Упругой деформацией валков можно пренебречь, то есть они считались абсолютно твердыми (*MAT_RIGID) [114, 116], в связи с этим более мелкое разбиение конечно-элементной сетки было выполнено не во всем объеме инструмента, а только на его поверхностях, непосредственно контактирующих с заготовкой. Конечно-элементные модели для прокатки сплошных профилей по схемам круг–квадрат и квадрат–круг показаны на рис. 4.14, *а* и 4.14, *б* соответственно.

Пакет LS-DYNA позволяет задать абсолютно жесткие тела двумя способами [116] – либо генерировать на поверхности тела сетку вручную, либо задать ссылку на файл геометрии в формате VDA или IGES. К основным преимуществам последнего способа следует отнести отсутствие так называемого «искусственного трения» и осцилляций в контакте из-за слишком грубой сетки

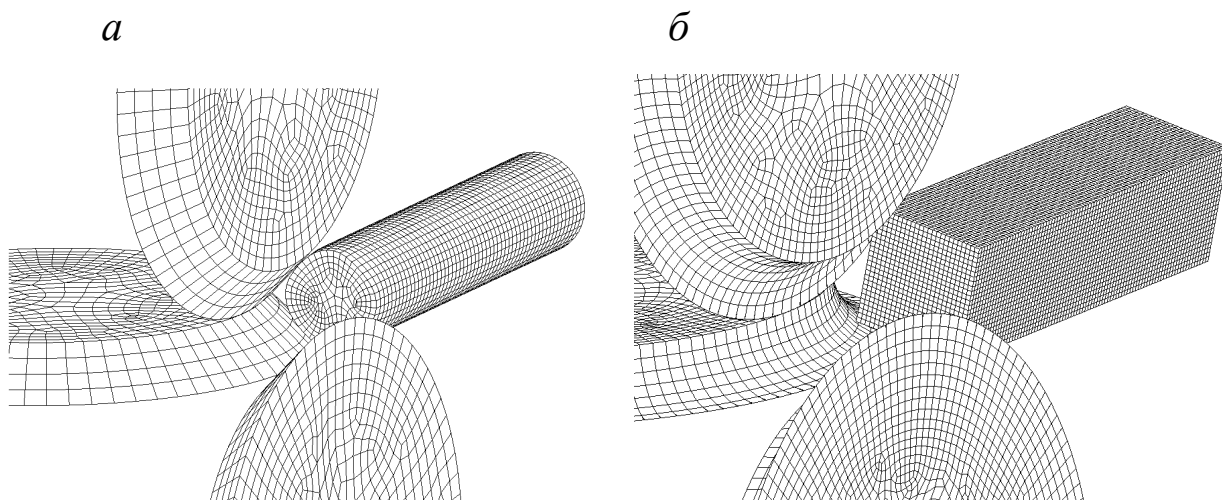


Рис. 4.14. Конечно-элементные модели валков и прокатываемого профиля (один валок условно не показан): *а* – проход круг–квадрат; *б* – проход квадрат–круг

соприкасающихся поверхностей. Недостатком такого способа является его «капризность»: проблемы с импортом сложной геометрии, возможность задать только один тип контакта – *CONTACT_ENTITY, невозможность использовать при этом способе адаптивное измельчение сетки на заготовке. Поэтому был применен первый способ.

Была использована модель упругопластического материала с деформационным и скоростным упрочнением. Эту модель сформулировали Крейг и Кей в 1976-ом году [118].

Скорость деформации накапливается для использования модели Коупера и Саймона, которая масштабирует сопротивление деформации через зависимый фактор от скорости деформации:

$$\sigma_s = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_{s0} + E_p \varepsilon_{eff}^p),$$

где p и C входящие постоянные (параметры, описывающие зависимость от скорости деформации); $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, определяемая как

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}}.$$

Сопротивление деформации σ_s – это сумма начального напряжения σ_{s0} и роста множителя $E_p \cdot \varepsilon_{eff}^p$, где E_p – модуль деформационного упрочнения:

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t};$$

ε_{eff}^p – степень пластической деформации

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt.$$

Скорость деформации состоит из общей и упругой (с индексом e) скоростями деформации

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^e.$$

Параметры скоростного и степенного упрочнения металла были взяты из литературных источников [119] для аустенитной нержавеющей стали марки типа 12X18Н9. В расчетах предполагалось, что изменение температуры во время деформации незначительно, и оно не учитывалось. Кривые деформационного и скоростного упрочнения были заданы для постоянной температуры $t = 1100^\circ\text{C}$.

Зависимость величины сопротивления деформации от степени деформации при постоянной скорости деформации была задана таблично в соответствии со следующими зависимостями (построены на основании данных [119]):

- для $\xi = 0,05c^{-1} - \sigma_s = 48,5 + 93,36\varepsilon - 102,14\varepsilon^2$ при $R^2 = 0,995$;
- для $\xi = 7,5c^{-1} - \sigma_s = 83,4 + 581,57\varepsilon - 818,45\varepsilon^2$ при $R^2 = 0,996$;
- для $\xi = 150c^{-1} - \sigma_s = 123,25 + 621,15\varepsilon - 879,28\varepsilon^2$ при $R^2 = 0,994$,

где $\varepsilon = \ln(\lambda)$ – степень деформации. Уравнения аппроксимированы и дают хорошие результаты при $\varepsilon = 0 \dots 0,4$. В расчетный модуль задавалось пять точек с шагом степени деформации 0,1, между точками кривой упрочнения происходила интерполяция по линейному закону. Модуль упругости для стали 12X18H9 при температуре 1100°С принимался равным 25 ГПа.

При прокатке трубы в круглом калибре устанавливалось заднее и переднее натяжения постоянной величины. Установка натяжений происходила после полного захвата трубы валками. Так как заранее не было известно поведение толщины стенки, то после выхода переднего конца трубы из калибра, задача останавливалась и устанавливался уровень переднего натяжения в соответствии с планом проведения эксперимента. Также предполагалось, что при выходе переднего конца трубы из калибра не возникало остаточных напряжений.

Для задания условий трения в контакте между инструментом и заготовкой был использован специально предназначенный для подобных расчетов тип контакта – *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE _TO_SURFACE [120]. Данный тип контакта позволяет задать комбинированный закон трения:

- $\tau = \mu p$ для $0 \leq \tau < \psi \tau_s$ (касательные напряжения трения описываются по закону Кулона);
- $\tau = \psi \tau_s$ для $\tau \geq \psi \tau_s$ (касательные напряжения трения описываются по закону Зибеля),

где μ принят равным 0,4; ψ – принят равным 0,7. Этот тип контакта хорошо подходит для расчета контактных задач, в которых одно из соприкасающихся тел является абсолютно жестким. Для снижения осцилляций в контакте, обу-

словленных дискретностью соприкасающихся поверхностей, было введено демпфирование, равное 20 % от критического (определяется программой автоматически). Вращение валков было задано в виде определенной угловой скорости вращения с помощью карт –

*DEFINE_CURVE и *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID в соответствии с планом эксперимента.

4.3. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния при прокатке по схеме круг–квадрат–круг

В соответствии с методикой, описанной в п. 4.2., решены в конечно-элементной постановке задачи расчета показателей напряженно-деформированного состояния при четырехвалковой прокатке сплошных профилей в квадратном и круглом калибрах конических валков. Построенная математическая модель, адекватность которой реальному процессу демонстрируется в разделе 4.7 на основании полученных опытных данных, дает возможность рассчитывать формоизменение заготовки в очаге обжатия и во внеконтактных зонах, компоненты тензоров напряжений и деформаций и определять параметры, характеризующие возможность обработки в калибрах без разрушения металла.

Для расчета степени использования запаса пластичности металла при прокатке необходимо предварительное определение напряженно-деформированного состояния, интенсивности деформации сдвига и показателя напряженного состояния в каждой точке деформируемого тела.

Используя диаграммы пластичности [122, 140] для прокатываемой марки стали возможно определить вероятность нарушения сплошности (разрушения) и соответственно максимально возможные вытяжки при прокатке.

В качестве примеров выполненных расчетов, дающих представление о характере распределения напряжений и деформаций, рассмотрены варианты прокатки прутков нержавеющей стали типа 12X18H9 по схемам круг–квадрат,

квадрат–круг, круг–круг. Схемы прокатки и построенные исходные сетки конечных элементов показаны на рис. 4.15.

На показанных схемах четвертый валок условно не показан для наблюдения за развитием контактной поверхности. При постановке всех задач как входящий, так и выходящий концы заготовки остаются свободными, то есть не рассматриваются натяжения и заневоливания от кручения.

В частности, рассматривается случай прокатки по схемам круг–квадрат (рис. 4.15, *а*) в калибре конических валков с максимальным диаметром $D_{\max} = 130$ мм и минимальным диаметром $D_{\min} = 104,5$ мм. Средний (расчетный) диаметр валков $\bar{D} = (D_{\max} + D_{\min}) / 2 = 117,25$ мм. Круглая в сечении заго-

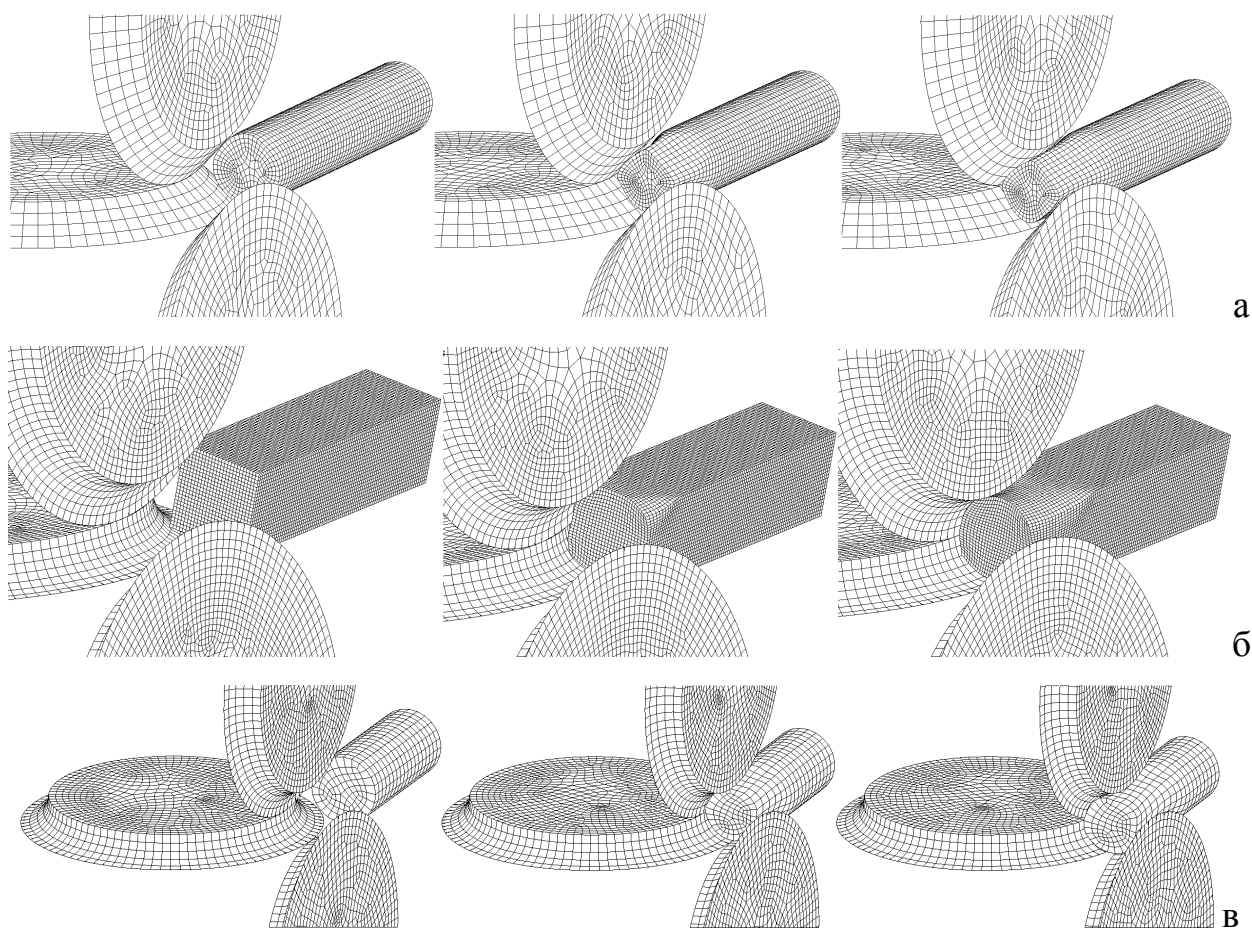


Рис. 4.15. Схемы прокатки прутков в четырехвалковых калибрах конических валков с сеткой конечных элементов: *а* – схема круг–квадрат; *б* – квадрат–круг; *в* – круг–круг

товка диаметром $d_0 = 25$ мм прокатывается в квадратном калибре со стороной $a = 18$ мм. Окружная скорость валков по среднему диаметру составляет 10 м/с,

что соответствует частоте вращения валков 1630 об/мин. Вытяжка в рассматриваемом проходе при условии заполнения калибра $\delta = 1$:

$$\lambda = \frac{\pi d_0}{4a^2} = 1,514.$$

С учетом выявленного при решении некоторого незаполнения калибра ($\delta = 0,9$) фактический коэффициент вытяжки составил $\lambda' = 1,552$.

Сопротивление металла горячей деформации при решении определялось в соответствии с литературными данными в зависимости от степени ($\varepsilon = \ln \lambda$) и скорости ($\xi = d\varepsilon / d\tau$) деформации при постоянной температуре $t = 1100^\circ\text{C}$. Контактное трение в процедуре расчета напряженно-деформированного состояния и формоизменение задавалось в соответствии с допущениями, описанными в разделе 4.2. Форма сечения заготовки при движении вдоль зоны обжатия длиной $l_0 = \sqrt{(d_0 - a)\bar{D}/2}$ изменялась, как это показано на рис. 4.16.

При анализе формоизменения установлен удельный угол скручивания заготовки в зоне обжатия ($\bar{\varphi} = \varphi / l_0$), который при рассматриваемой в примере вытяжке составил $\bar{\varphi} = 1,04$ град/мм.

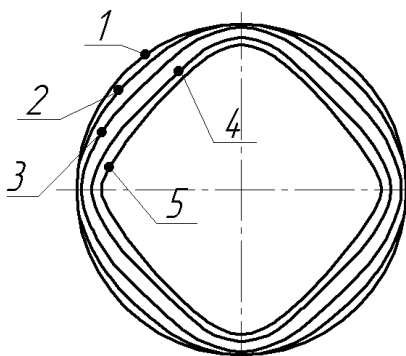


Рис. 4.16. Последовательное от входа до выхода зоны обжатия изменение формы поперечного сечения заготовки при прокатке по схеме круг–квадрат:

1 – входное сечение; 2 – на расстоянии $0,25l_0$ от входа; 3 – $0,5l_0$;
4 – $0,75l_0$; 5 – сечение на выходе из валков

На рис. 4.17 показано развитие скручивания заготовки при обжатии в конических валках. Ось А–В входного поперечного сечения на время обжатия на длине l_0 поворачивается по отношению к оси разъема на угол φ . При этом угол поворота изменяется нелинейно по отношению к продольной координате очага

деформации. При относительной продольной координате $0,5l_0$ угол скручивания составляет $15,1^\circ$, а при выходе из зоны обжатия $\varphi = 19,6^\circ$.

Конечно-элементная модель процесса обжатия в четырехвалковом калибре позволяет определить все компоненты тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} , а также главные напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} в объеме очага деформации. Располагая этими данными, удалось построить распределения по сечениям среднего нормального напряжения σ (рис.4.18) и относительного среднего нормального напряжения σ/T (рис.4.19), где T – интенсивность касательных напряжений.

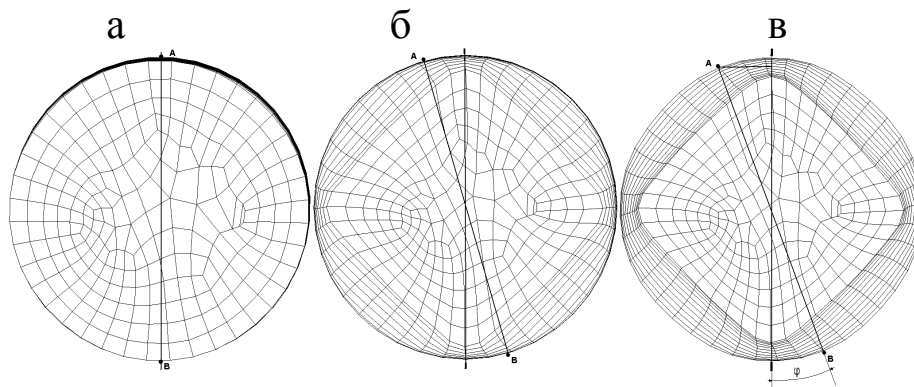


Рис. 4.17. Развитие угла скручивания круглой в сечении заготовки при прокатке в квадратном калибре конических валков: а – сечение выхода; б – сечение на расстоянии $0,5l_0$ от входа; в – сечение выхода из валков

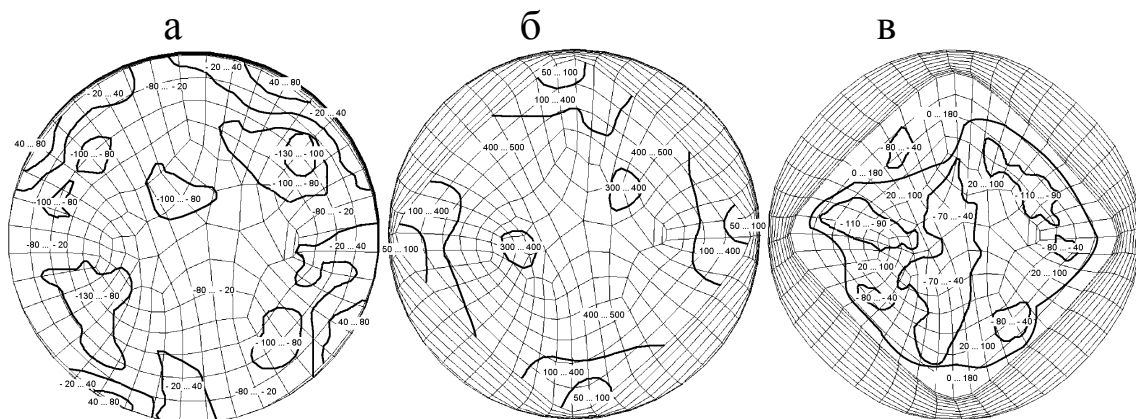


Рис. 4.18. Распределение среднего нормального напряжения σ , МПа по сечениям входа (а), в середине очага деформации (б) и выхода (в)

С точки зрения пластичности металла при прокатке круг–квадрат наиболее неблагоприятное напряженное состояние возникает в зонах выпусков калибров, особенно в средней части (по длине) зоны обжатия.

Возможности использованных пакетов прикладных программ, реализующих решения упруго-пластических задач МКЭ, не позволяют анализировать энергосиловые параметры в процессах ОМД. Поэтому приходится накопленные данные по распределению напряжений и деформации в объеме зоны обжатия переносить в другие пакеты, и использовать более универсальные вычислительные средства.

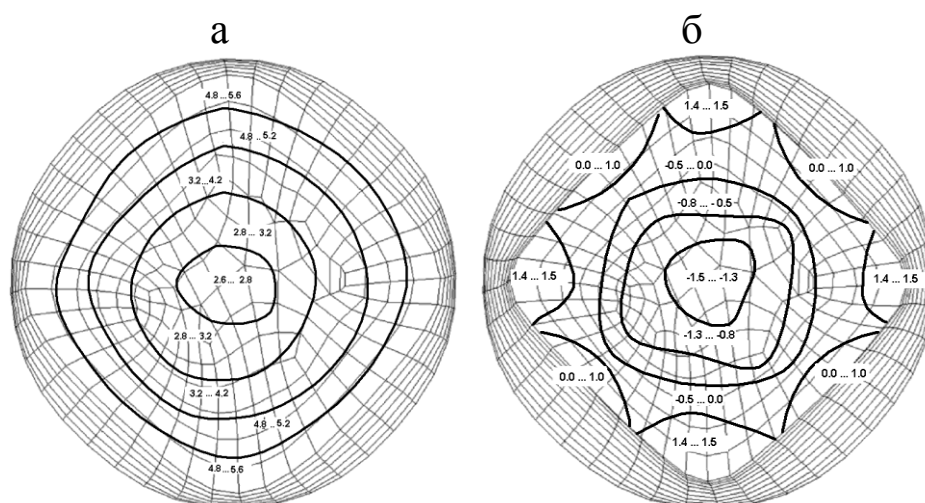


Рис. 4.19. Распределение относительного среднего нормального напряжения σ/T в среднем (а) и выходном сечениях (б) полосы при прокатке по схеме круг–квадрат

Например, построение эпюры контактных давлений σ_n выполнено в среде Calc.OpenOffice.org. При этом компоненты σ_{ni} определялись в точках поверхности контакта, исходя из вычисленных компонентов тензора деформации σ_{ij} и направляющих косинусов нормали поверхности вала в рассматриваемой точке n_i :

$$\sigma_{ni} = \sigma_{ij} n_j; \quad \sigma_n = \sigma_{ni} n_i.$$

Для рассматриваемого случая прокатки нержавеющей стали по схеме круг–квадрат в точках контактной поверхности определены σ_n и по ним построена эпюра контактных давлений, показанная на рис. 4.20.

С целью построения эпюры σ_n контактная поверхность была условно разбита на 89 элементов, как это показано на рис. 4.21. Все показатели напряженного состояния определялись в центре представленных элементов.

Кроме контактных давлений во всех указанных на рис. 4.21 элементах определялись значения σ/T и показателя Лоде $\mu_\sigma = 2(\sigma_{22} - \sigma_{33})/(\sigma_{11} - \sigma_{33}) - 1$ [143], которые помещены в табл. 4.1.

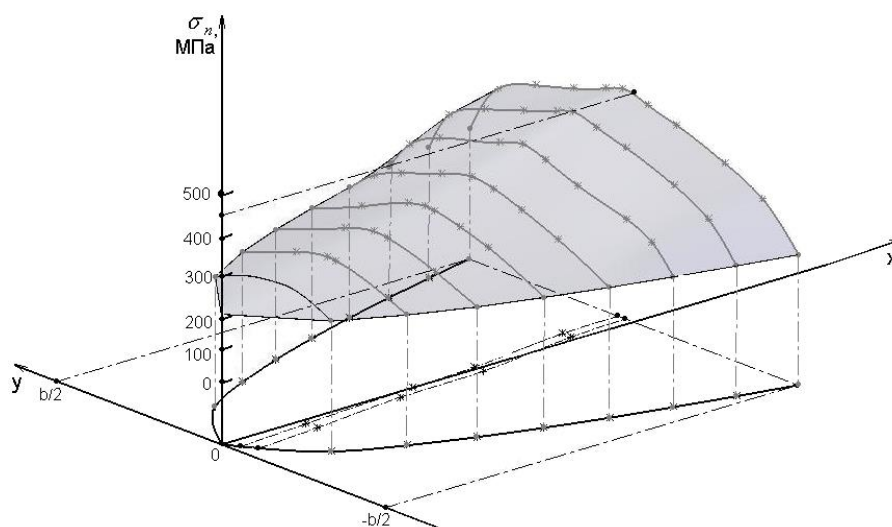


Рис. 4.20. Распределение контактных давлений при прокатке по схеме круг–квадрат полосы стали 12Х18Н9 при температуре 1100⁰С и скорости прокатки 10 м/с

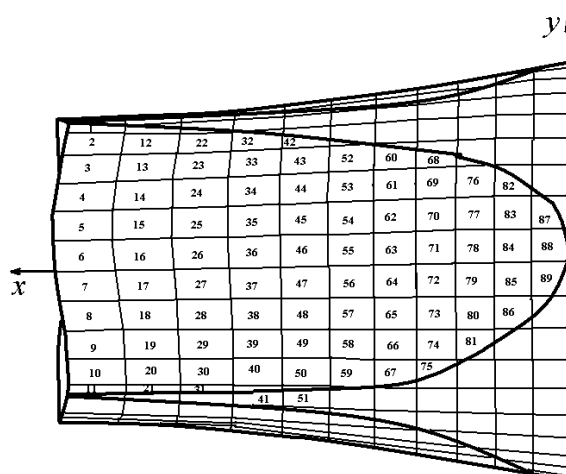


Рис. 4.21. Условное разбиение контактной поверхности на прямоугольные элементы

Рассчитанные компоненты тензора деформаций ε_{ij} позволяют найти в каждой точке зоны обжатия интенсивность скоростей деформации сдвига N и накопленную за время деформации τ_0 степень деформации сдвига:

$$\Lambda = \int_0^{\tau_0} N d\tau, \text{ где } \tau - \text{текущее время деформирования.}$$

На рис. 4.22 приведены графики зависимости Λ от продольной относительной координаты зоны обжатия l/l_0 . $l/l_0 = 0$ соответствует сечению входа,

$l/l_0 = 1$ – сечению выхода. Процесс накопления степени деформации сдвига для материальных частиц,двигающихся по оси заготовки, по середине грани и по ребру формируемого квадратного профиля существенно различен.

Таблица 4.1

Показатели напряженного состояния на контактной поверхности при четырехвалковой прокатке по схеме круг–квадрат на конических валках

№ п/п	σ/T	μ_σ	№	σ/T	μ_σ	№	σ/T	μ_σ
1	1,236	0,0086	31	-3,928	0,4850	61	-3,848	-0,1587
2	1,532	-0,3425	32	-5,652	-0,2046	62	-2,986	-0,0137
3	0,190	-0,5010	33	-1,714	0,4170	63	-2,393	-3,2341
4	0,577	0,0345	34	-3,756	0,2319	64	-2,356	0,2720
5	1,297	-0,0483	35	-1,831	0,3360	65	-0,499	0,5227
6	1,189	0,3281	36	-1,933	-0,2138	66	1,672	0,7437
7	0,956	-0,0734	37	-0,776	0,3576	67	-5,388	-0,1392
8	0,175	0,1095	38	-0,612	0,0716	68	-2,435	0,9405
9	0,068	-0,2409	39	-1,859	-0,1514	69	-1,634	-0,0033
10	0,205	0,3959	40	-1,715	0,2477	70	-1,245	-0,9347
11	-0,099	0,0393	41	-5,561	0,0072	71	0,042	-0,2633
12	-1,026	-0,0431	42	-5,338	-0,8573	72	1,367	-0,5294
13	-0,846	-0,0083	43	-3,941	-0,1737	73	-4,234	0,1861
14	-0,366	0,3148	44	-2,620	0,0206	74	-3,996	0,0563
15	0,038	0,3720	45	-1,110	-0,1674	75	-7,529	-0,1699
16	-1,460	0,5909	46	-2,358	-0,4858	76	-4,611	0,4930
17	-1,172	-0,7397	47	-2,236	-0,2996	77	2,065	-0,4447
18	-0,646	0,2058	48	-0,940	-0,0823	78	3,580	0,6251
19	-0,376	-0,3927	49	-2,963	-0,2460	79	-0,008	0,5772
20	-0,166	-0,6202	50	-3,575	-0,2352	80	-0,953	-0,4607
21	-0,969	-0,4703	51	-5,836	0,2002	81	-4,064	0,0014
22	-4,210	0,2347	52	-5,549	0,2540	82	-5,458	-0,1975
23	-0,907	0,1076	53	-4,128	-0,5900	83	0,887	0,0989
24	-1,750	-0,6402	54	-1,497	0,4949	84	2,256	-0,7754
25	-3,080	-0,2316	55	-3,675	-0,3255	85	-1,316	0,2441
26	-2,166	0,2112	56	-4,399	0,3827	86	-0,843	-0,2865
27	-0,297	-0,3120	57	-2,147	-0,1194	87	-7,657	0,7716
28	-1,709	0,1324	58	0,917	-0,1991	88	-3,735	0,4598
29	-2,261	0,0315	59	-4,182	-0,5861	89	-0,197	0,4472
30	-2,567	-0,2888	60	-5,063	-0,0786			

Из приведенных графиков видно, что примененная на практике оценка деформации сдвига $\Lambda = \sqrt{3} \ln \lambda = \sqrt{3} \ln 1,552 = 0,62$ в точности соответствует накопленной степени деформации сдвига материальной частицы,двигающейся по оси прокатки.

Распределение степени деформации сдвига по сечениям прокатываемой по рассматриваемой схеме заготовки показано на рис. 4.23.

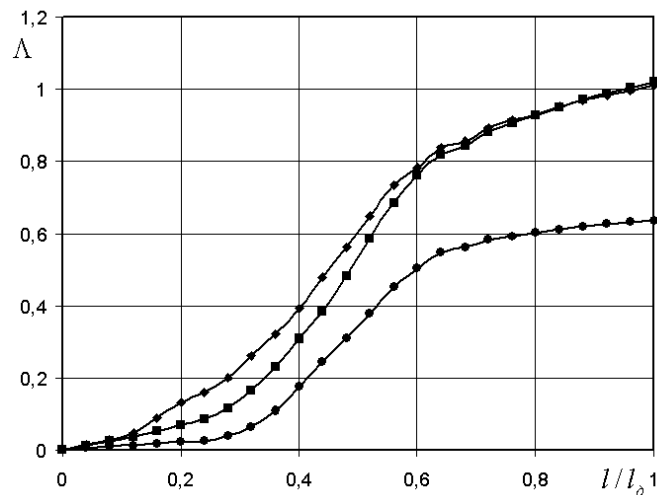


Рис. 4.22. Степень деформации сдвига, накопленная материальной частицей при прохождении через очаг деформации, в случае прокатки по схеме круг–квадрат в калибре конических валков: ● – по оси заготовки; ■ – по ребру полосы; ◆ – по середине грани

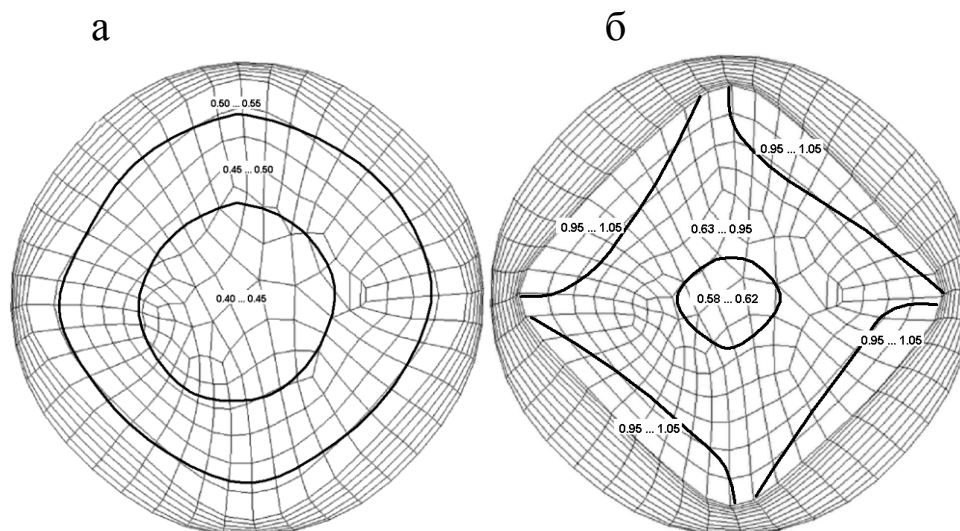


Рис. 4.23. Распределение Λ по сечениям круглой заготовки, прокатываемой в квадратном калибре конических валков: а – сечение на расстоянии $0,5l_0$ от входа; б – сечение выхода

Наибольшей накопленной степенью деформации характеризуются зоны ребровой части профиля, причем части этих зон, контактирующие с валком

большого диаметра. Следовательно, можно сделать вывод, что максимум Λ достигается в ребровой части квадратного профиля, контактирующей с зоной отставания поверхности вала.

Анализ напряженно-деформированного состояния при прокатке по схеме квадрат–круг в калибре конических валков (рис. 4.15, б) для той же марки нержавеющей стали выполнен, в качестве примера, для случая обжатия квадратной в сечении полосы $a_0 \times a_0 = 24 \times 24$ мм в круглом калибре диаметром $d = 24$ мм с расчетной вытяжкой $\lambda = 1,270$ и реальной $\lambda' = 1,272$. Температура и скорость прокатки приняты, как и в предыдущем примере: $t = 1100^\circ\text{C}$; $V = 10$ м/с (на среднем диаметре вала $\bar{D} = 118$ мм). Схема входа полосы в калибр и форма контактной поверхности показаны на рис. 4.24.

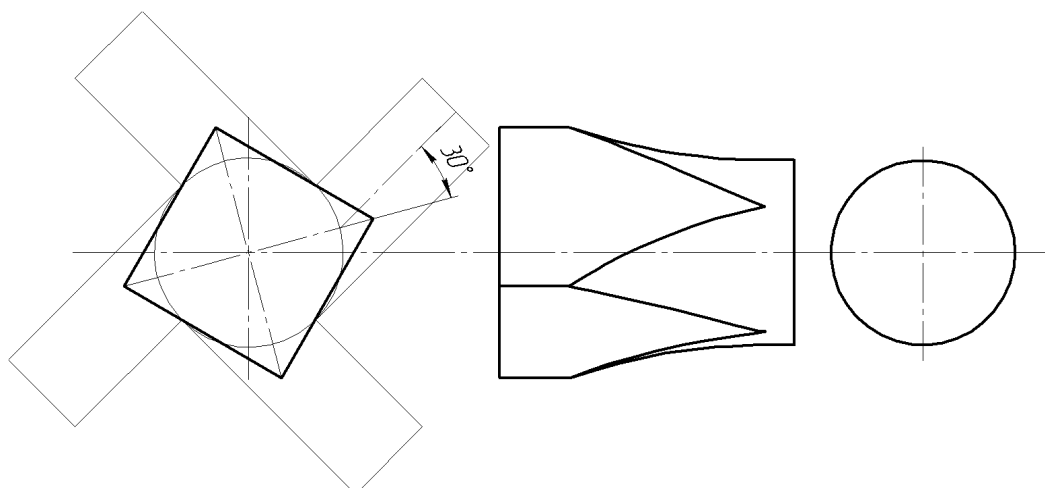


Рис. 4.24. Схема прокатки квадратной полосы в круглом калибре конических валков

Показанный на рис. 4.24 угол разворота диагонали сечения заготовки по отношению к плоскости сечения калибра (при среднем диаметре) и равный 30° был в опытах признан оптимальным, позволяющим обеспечить максимальную вытяжку без образования заусенцев в зазорах сопряженных валков. При этом данный угол гарантирует отсутствие вращения входящей в валки полосы и, следовательно, исключает нагрузки на вводные проводковые устройства.

Последовательное изменение формы поперечного сечения заготовки от квадрата до круга при прохождении зоны обжатия показано на рис. 4.25.

В рамках той же математической конечно-элементной модели определялись значения σ_{ij} и ε_{ij} , по которым в среде Calc находились основные показатели напряженного и деформированного состояния. В качестве примера на рис. 4.26 показано распределение среднего относительного нормального напряжения σ/T для двух сечений заготовки при обжатии в круглом калибре.

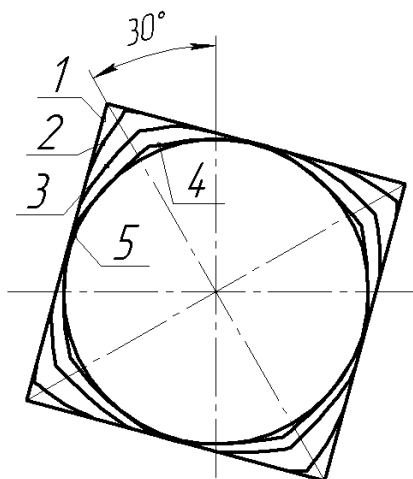


Рис. 4.25. Контур сечения заготовки при прохождении очага деформации:
1 – входное сечение; 2 – сечение на расстоянии $0,25l_0$; 3 – $0,5l_0$; 4 – $0,75l_0$;
5 – сечение выхода из валков

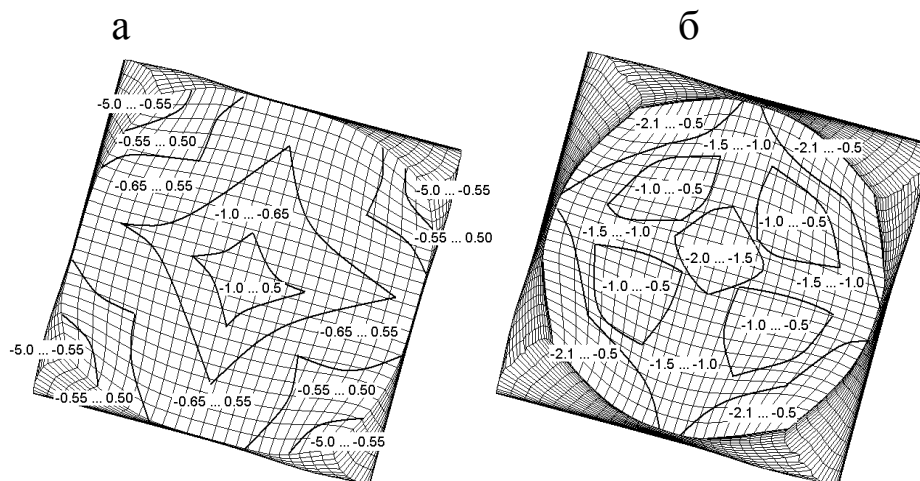


Рис. 4.26. Распределение значений σ/T в сечениях на расстоянии $0,5l_0$ от входа (а) и выхода из валков (б)

С точки зрения пластичности металла данная схема напряженного состояния более благоприятна, чем предыдущая, поскольку, по крайней мере, на выходе гарантирует отрицательные значения σ/T по всему сечению. Однако зона выпусков круглого четырехвалкового калибра характеризуется высокой

накопленной степени деформации сдвига, что хорошо видно на рис. 4.27. Оценочное значение степени деформации $\Lambda' = \sqrt{3} \ln \lambda$ в этом случае соответствует Λ , накопленной за обжатие материальной частицей, выходящей на середину ручья.

Несомненный практический интерес представляет прокатка в круглом калибре конических валков круглой в сечении заготовки, схематично показанная на рис. 4.15, в. При использовании круглых калибров цилиндрических валков

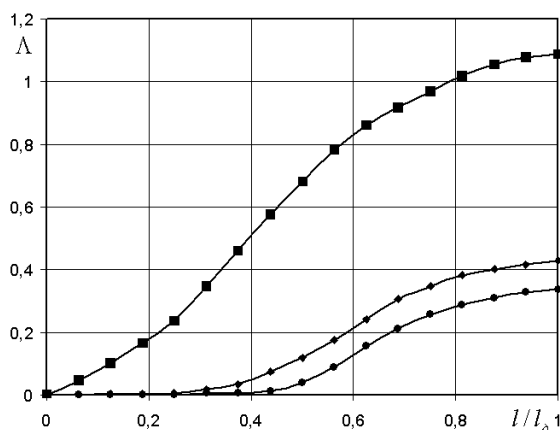


Рис. 4.27. Степень деформации сдвига, накопленная материальной частицей при прохождении через очаг деформации в случае прокатки по схеме квадрат–круг:
 ● – по оси заготовки; ■ – по ребру полосы; ◆ – по середине грани

прокатка по схеме круг–круг, даже со значительными выпусками или при эксцентриситете ручьев, невозможна с промышленно пригодными вытяжками. Круглый многовалковый калибр конических валков благодаря скручиванию полосы в зоне обжатия принципиально меняет картину формоизменения и позволяет без образования заусенцев прокатывать круглые заготовки с большими обжатиями. В этом случае схема круг–круг по вытяжной способности при последовательной прокатке успешно конкурирует с большинством схем прокатки простых сортов профилей равноосное–неравноосное–равноосное сечение. В качестве примера рассмотрен случай прокатки заготовки диаметром $d_0 = 30,6$ мм в круглом калибре диаметром $d = 24$ мм с вытяжкой $\lambda = 1,6$. Возможность осуществления такой прокатки подтверждена экспериментально. Все условия и ограничения при анализе схемы прокатки круг–круг оставлены такими же, как в двух предыдущих примерах. Изменение формы поперечного сече-

ния заготовки при движении вдоль зоны обжатия в круглом калибре конических валков показано на рис. 4.28.

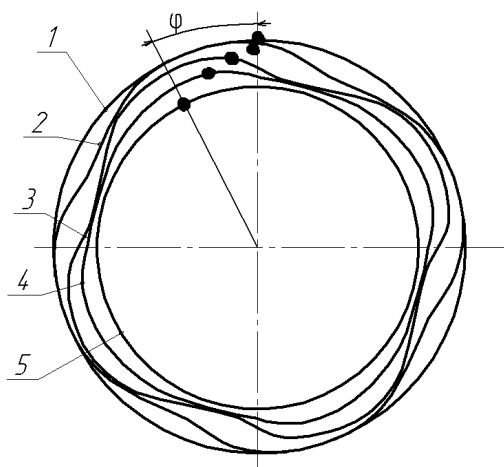


Рис. 4.28. Последовательное изменение формы поперечного сечения круглой заготовки при ее движении вдоль зоны обжатия круглого калибра конических валков: 1 – входное сечение; 2 – сечение на расстоянии $0,25l_0$; 3 – $0,5l_0$; 4 – $0,75l_0$; 5 – сечение выхода

Угловое смещение реперных точек на контуре сечения показывает величину скручивания заготовки в зоне обжатия. От входа до выхода сечение поворачивается на угол φ . Удельный угол скручивания при этом составляет $\bar{\varphi} = 1,37$ град/мм, то есть существенно больше, чем при прокатке по схеме круг–квадрат, где скручиванию в определенной степени препятствует квадратное сечение формируемой полосы.

Как хорошо видно на рис. 4.28, в момент входа круглой полосы в конические валки, слегка скругленные реборды большего диаметра продавливают с четырех сторон боковую поверхность заготовки. При кручении заготовки боковые вмятины смещаются от зон сопряжения валков, что и предотвращает переполнение калибра и образования заусенцев. Только благодаря временному нарушению круглой формы поперечного сечения и скручиванию профиля удастся достигнуть столь высоких вытяжек при прокатке по схеме круг–круг. За два последовательных прохода по этой схеме обеспечивается вытяжка $\lambda_{\Sigma} = 2,56$.

Накопление степени деформации сдвига вдоль очага деформации для трех характерных материальных точек показано на рис. 4.29, а распределение Λ в сечении выхода при прокатке по схеме круг–круг – на рис. 4.30.

Представленная математическая модель процессов многовалковой прокатки достаточно универсальна и позволяет анализировать практически все необходимые для технологического проектирования параметры при широком варьировании условий прокатки. Задачи прокатки по различным схемам разли-

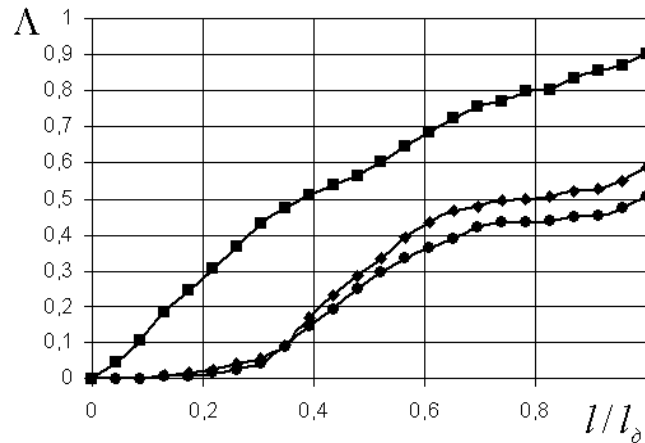


Рис. 4.29. Степень деформации сдвига накопленная материальной частицей при прохождении через очаг деформации в случае прокатки по схеме круг–круг:
 ■ – выпуск калибра; ◆ – дно ручья; ● – по оси заготовки

чаются лишь геометрической постановкой, которая осуществляется достаточно просто современными графическими средствами. Более точное представление расчетных зависимостей и в частности устранение асимметрии в представлении распределений значений σ/T , σ и Λ по сечениям обжимаемых заготовок возможно увеличением числа конечных элементов. Однако это значительно удлиняет вычислительную процедуру и не всегда целесообразно.

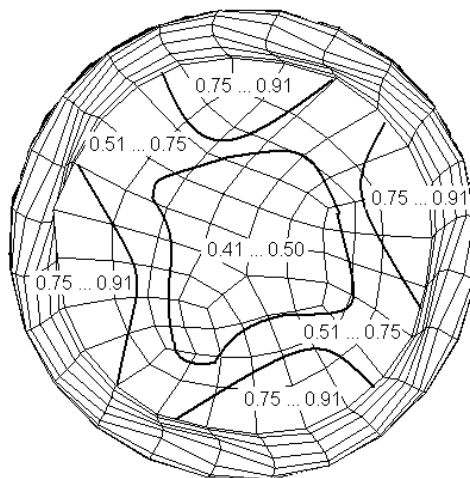


Рис. 4.30. Распределение степени деформации сдвига в сечении выхода из круглого калибра конических валков

4.4. Вычислительный эксперимент на базе конечно-элементной модели редукционно-растяжной прокатки труб

Хотя редукционная проката труб в круглых калибрах и подобна уже рассмотренной прокатке сплошных профилей по схеме круг–круг, но отличается большим количеством входных независимых параметров, учет которых в полнофакторном анализе удлинит вычислительную процедуру, делая ее непригодной в технологическом проектировании. Поэтому в настоящей работе использована методика вычислительного эксперимента, проводимого по ортогональному плану на базе конечно-элементной модели.

При постановке эксперимента при помощи МКЭ был выбран ряд исследуемых параметров: относительное изменение толщины стенки трубы $\left(\frac{s_{i-1} - s_i}{d_{i-1}} \right)$, величина относительного катающего диаметра $\left(\frac{D_k}{D} \right)$. Основными факторами, определяющими исследуемые величины, являются обжатие трубы по диаметру в калибре $\left(\varepsilon_\varnothing = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \right)$, относительный диаметр вала $\left(A = \frac{\bar{D}}{d_i} \right)$, окружная скорость вращения валков на среднем диаметре $(v|_{d=\bar{D}})$, геометрический параметр исходной трубы $\left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right)$, переднее натяжение $\left(z_i = \frac{\sigma_{s_i}}{\sigma_i} \right)$ и заднее натяжение трубы $\left(z_{i-1} = \frac{\sigma_{s_{i-1}}}{\sigma_{i-1}} \right)$ в клетки. В принятых обозначениях индекс i относится к параметру прокатанной трубы, соответственно $(i-1)$ относится к параметру исходной трубы. Заглавные обозначения относятся к калибру, прописные относятся к заготовке.

Большое число факторов обуславливает трудности экспериментального изучения процесса редукционно-растяжной прокатки труб, так как довольно сложно учесть влияние каждого из этих факторов и обеспечить постоянство условий эксперимента. Поэтому для выявления многофакторной зависимости

параметров редуccionной прокатки необходимо выбрать такие планы эксперимента, которые позволяют на основе четких формализованных правил свести ошибку эксперимента к минимуму и оценить влияние управляющих факторов.

Обзор литературы показал, что влияние факторов редуccionной прокатки имеет нелинейное влияние на величину отклика, то есть на исследуемые величины. Таким образом, приходится анализировать факторы, имеющие более 2-х уровней. Если предполагается, что влияние факторов на зависимую переменную нелинейное, то необходимы по меньшей мере три уровня для проверки линейных и квадратичных эффектов. Более того, некоторые факторы могут быть категориальными с более чем двумя категориями.

Методология проведения полнофакторного эксперимента при постановке задачи, представленной в табл. 4.2, требует проведения $3^6 = 729$ экспериментов (три уровня варьирования шести факторов). Проведение такого большого числа экспериментов, ввиду больших затрат машинного времени (для выполнения моделирования МКЭ), невозможно.

Таблица 4.2

Условия проведения экспериментов по исследованию зависимостей
четырехвалковой прокатки труб

Уровни параметров	Варьируемые параметры											
	Обжатие по диаметру		Относительный диаметр вала		Скорость вращения валков, м/с		Геометрический параметр исходной трубы		Заднее натяжение		Переднее натяжение	
	$\varepsilon = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}}$		$A = \bar{D}/d_i$		v		s_{i-1}/d_{i-1}		z_{i-1}		z_i	
Код	x_1		x_2		x_3		x_4		x_5		x_6	
Верхний	0,25	+1	18,0	+1	10,0	+1	0,15	+1	0,8	+1	0,8	+1
Основной	0,15	0	12,0	0	6,0	0	0,10	0	0,6	0	0,6	0
Нижний	0,05	-1	6,0	-1	2,0	-1	0,05	-1	0,4	-1	0,4	-1
Интервал варьирования	0,10		6,0		4,0		0,05		0,2		0,2	

Для планов 3^{k-p} (k – число факторов; p – число характеризующее сокращение числа необходимых опытов) разработан метод для отсеивания максимального числа (главных) эффектов при возможно меньшем числе опытов – так называемые планы Бокса-Бенкена [144]. Эти планы не имеют простых генераторов (конструируются комбинированием двухуровневых факторных планов с планами неполных блоков) и имеют сложную связь взаимодействий.

План эксперимента, по методу Бокса-Бенкена, 3^{6-2} требует проведения 81 эксперимента. Такой план представлен в табл. 4.3.

Для проведения вычислительного эксперимента требуется задание необходимой геометрии конечно-элементной модели: максимальный диаметр валка D_{\max} ; исходная толщина стенки трубы s_{i-1} ; исходный диаметр трубы d_{i-1} ; диаметр калибра (диаметр прокатанной трубы) d_i . Значения выбранных геометрических параметров должны соответствовать уровням факторов плана эксперимента: обжатие трубы по диаметру в калибре $\left(\varepsilon_{\varnothing} = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \right)$, относительный диаметр валка $\left(A = \frac{\bar{D}}{d_i} \right)$ и геометрический параметр исходной трубы $\left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right)$.

Подбор геометрических параметров производился симплекс-методом поиска решений [145] в вышеописанном факторном пространстве. Для поиска решений были заданы следующие ограничения:

$$D_{\max}, \text{ мм} \in [250; 720]; s_{i-1}, \text{ мм} \in [2; 9]; d_{i-1}, \text{ мм} \in [15; 60]; d_i, \text{ мм} \in [15; 50].$$

Целевые значения при поиске решений задавались в соответствии с планом эксперимента для значений: обжатие трубы по диаметру $\varepsilon_{\varnothing} = \{0,05; 0,15; 0,25\}$; относительный диаметр валка $A = \{6; 12; 18\}$; исходная толстенность трубы $\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} = \{0,05; 0,1; 0,15\}$. Симплекс-метод требует идентификацию целевой функции. В качестве целевой функции была задана зависимость

обжата труба по диаметру в виде $\varepsilon_{\varnothing} = f(D_{\max}, s_{i-1}, d_{i-1}, d_{i-1})$ при фиксированных значениях A и $\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}$.

Таблица 4.3

Матрица планирования Бокса-Бенкена (3^{6-2})

Номер опыта	ε	A	υ	s_{i-1}/d_{i-1}	z_{i-1}	z_i	Номер опыта	ε	A	υ	s_{i-1}/d_{i-1}	z_{i-1}	z_i
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	41	0	0	0	0	-1	1
2	-1	-1	-1	0	1	0	42	0	0	0	1	1	-1
3	-1	-1	-1	1	0	1	43	0	0	1	-1	-1	0
4	-1	-1	0	-1	1	-1	44	0	0	1	0	1	1
5	-1	-1	0	0	0	0	45	0	0	1	1	0	-1
6	-1	-1	0	1	-1	1	46	0	1	-1	-1	1	-1
7	-1	-1	1	-1	0	-1	47	0	1	-1	0	0	0
8	-1	-1	1	0	-1	0	48	0	1	-1	1	-1	1
9	-1	-1	1	1	1	1	49	0	1	0	-1	0	-1
10	-1	0	-1	-1	-1	1	50	0	1	0	0	-1	0
11	-1	0	-1	0	1	-1	51	0	1	0	1	1	1
12	-1	0	-1	1	0	0	52	0	1	1	-1	-1	-1
13	-1	0	0	-1	1	1	53	0	1	1	0	1	0
14	-1	0	0	0	0	-1	54	0	1	1	1	0	1
15	-1	0	0	1	-1	0	55	1	-1	-1	-1	0	0
16	-1	0	1	-1	0	1	56	1	-1	-1	0	-1	1
17	-1	0	1	0	-1	-1	57	1	-1	-1	1	1	-1
18	-1	0	1	1	1	0	58	1	-1	0	-1	-1	0
19	-1	1	-1	-1	-1	0	59	1	-1	0	0	1	1
20	-1	1	-1	0	1	1	60	1	-1	0	1	0	-1
21	-1	1	-1	1	0	-1	61	1	-1	1	-1	1	0
22	-1	1	0	-1	1	0	62	1	-1	1	0	0	1
23	-1	1	0	0	0	1	63	1	-1	1	1	-1	-1
24	-1	1	0	1	-1	-1	64	1	0	-1	-1	0	-1
25	-1	1	1	-1	0	0	65	1	0	-1	0	-1	0
26	-1	1	1	0	-1	1	66	1	0	-1	1	1	1
27	-1	1	1	1	1	-1	67	1	0	0	-1	-1	-1
28	0	-1	-1	-1	1	1	68	1	0	0	0	1	0
29	0	-1	-1	0	0	-1	69	1	0	0	1	0	1
30	0	-1	-1	1	-1	0	70	1	0	1	-1	1	-1
31	0	-1	0	-1	0	1	71	1	0	1	0	0	0
32	0	-1	0	0	-1	-1	72	1	0	1	1	-1	1
33	0	-1	0	1	1	0	73	1	1	-1	-1	0	1
34	0	-1	1	-1	-1	1	74	1	1	-1	0	-1	-1
35	0	-1	1	0	1	-1	75	1	1	-1	1	1	0
36	0	-1	1	1	0	0	76	1	1	0	-1	-1	1
37	0	0	-1	-1	1	0	77	1	1	0	0	1	-1
38	0	0	-1	0	0	1	78	1	1	0	1	0	0
39	0	0	-1	1	-1	-1	79	1	1	1	-1	1	1
40	0	0	0	-1	0	0	80	1	1	1	0	0	-1
							81	1	1	1	1	-1	0

Поиск в факторном пространстве осуществлялся до достижения условия $\varepsilon_{\varnothing} - \varepsilon_{\varnothing i} = 0$, где $\varepsilon_{\varnothing i}$ – i -е значение уровня фактора в соответствии с планом эксперимента. Начальная точка в факторном пространстве для поиска решений была задана следующими условиями: $D_{\max} = 300$ мм; $s_{i-1} = 5$ мм; $d_{i-1} = 30$ мм; $d_i = 30$ мм.

Поиск решений для геометрической постановки представлен в табл. 4.4.

Таблица 4.4

№ п/п	Обжатие	Относительный диаметр валка	Толсто-стенность исходной трубы	Максимальный диаметр валка, мм	Диаметр исходной трубы, мм	Диаметр калибра, мм	Исх. толщина стенки трубы, мм
1	0,05	6	0,05	297,43	48,17	45,76	2,41
2	0,05	6	0,1	296,51	48,02	45,62	4,80
3	0,05	6	0,15	296,47	48,01	45,61	7,20
4	0,05	12	0,05	475,01	40,00	38,00	2,00
5	0,05	12	0,1	300,63	25,32	24,05	2,53
6	0,05	12	0,15	300,61	25,31	24,05	3,80
7	0,05	18	0,05	703,01	40,00	38,00	2,00
8	0,05	18	0,1	351,50	20,00	19,00	2,00
9	0,05	18	0,15	301,42	17,15	16,29	2,57
10	0,15	6	0,05	298,33	54,00	45,90	2,70
11	0,15	6	0,1	295,92	53,56	45,53	5,36
12	0,15	6	0,15	295,72	53,52	45,50	8,03
13	0,15	12	0,05	425,00	40,00	34,00	2,00
14	0,15	12	0,1	300,62	28,29	24,05	2,83
15	0,15	12	0,15	300,60	28,29	24,05	4,24
16	0,15	18	0,05	629,00	40,00	34,00	2,00
17	0,15	18	0,1	314,50	20,00	17,00	2,00
18	0,15	18	0,15	301,43	19,17	16,29	2,88
19	0,25	6	0,05	292,50	60,00	45,00	3,00
20	0,25	6	0,1	292,50	60,00	45,00	6,00
21	0,25	6	0,15	292,50	60,00	45,00	9,00
22	0,25	12	0,05	375,00	40,00	30,00	2,00
23	0,25	12	0,1	300,39	32,04	24,03	3,20
24	0,25	12	0,15	300,38	32,04	24,03	4,81
25	0,25	18	0,05	555,00	40,00	30,00	2,00
26	0,25	18	0,1	554,99	40,00	30,00	4,00
27	0,25	18	0,15	554,98	40,00	30,00	6,00

4.5. Статистический анализ результатов вычислительного эксперимента и построение зависимостей катающего диаметра и изменения толщины стенки

Пусть n – число измерений факторов $X_1, X_2 \dots X_k$ и соответствующих значений переменной Y . Предполагается, что

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \beta_2 \cdot x_{i1}^2 + \dots + \beta_{k-1} \cdot x_{ik} + \beta_k \cdot x_{ik}^2 + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где первый индекс значения x_{ik} относится к номеру наблюдения, второй – к номеру фактора; ε_i – некоррелированные, нормально распределенные случайные величины, такие, что $M\varepsilon_i = 0$ и $M\varepsilon_i^2 = \sigma^2$.

В матричной форме вышеприведенные соотношения имеют вид

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon.$$

Рассмотрим оценку коэффициентов регрессии и дисперсии σ^2 ошибок. В качестве оценки $\hat{\beta}$ для вектор-столбца неизвестных коэффициентов регрессии β возьмем

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (4.4)$$

В предположениях модели оценка (4.4) является несмещенной, эффективной и состоятельной, если ранг матрицы X равен $k + 1$ (теорема Гаусса-Маркова).

Более того, вектор оценок $\hat{Y} = X\hat{\beta}$ зависимой переменной минимально (в смысле квадрата нормы разности) отличается от вектора Y заданных значений:

$$\|Y - \hat{Y}\|^2 = \|Y - X\hat{\beta}\|^2 \rightarrow \min \text{ по } \hat{\beta}.$$

Ковариационная (дисперсионная) матрица равна

$$D\hat{\beta} = (\hat{\beta} - \beta)(\hat{\beta} - \beta)^T = \sigma^2 (X^T X)^{-1} = \sigma^2 Z, \text{ где } Z = (X^T X)^{-1}.$$

Далее обозначим вектор остатков (или невязок) как

$$e = Y - \hat{Y} = Y - X\hat{\beta} = \left[I - X(X^T X)^{-1} X^T \right] Y = BY,$$

здесь $B = I - X(X^T X)^{-1} X^T$ – матрица; можно проверить, что $B^2 = B$. Для остаточной суммы квадратов $\|e\|^2$ справедливо соотношение

$$M\|e\|^2 = M \sum_{i=1}^n e_i^2 = (n - k - 1)\sigma^2,$$

откуда следует, что несмещенной оценкой для σ^2 является

$$s^2 = \frac{\|e\|^2}{n - k - 1} = \frac{Y^T B Y}{n - k - 1}$$

В предположениях модели справедливы следующие свойства оценок:

- 1) $(n - k - 1) \frac{s^2}{\sigma^2}$ имеет распределение χ^2 с $n - k - 1$ степенями свободы (χ_{n-k-1}^2);
- 2) оценки $\hat{\beta}$ и s^2 независимы.

Справедливо соотношение

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2, \text{ или } SS_T = SS_E + SS_R.$$

Значение коэффициента детерминации R^2 возрастает с ростом числа переменных в регрессии, что не означает улучшения качества предсказания. Поэтому для оценки качества подгонки регрессионной модели к наблюдаемым значениям y_i введем скорректированный коэффициент детерминации

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{(n - 1)}{(n - k - 1)}. \quad (4.5)$$

Различные регрессии (с различным набором переменных) можно сравнивать по скорректированному коэффициенту детерминации (4.5) и принять тот вариант регрессии, для которого R_{adj}^2 максимален.

Исследованы доверительные интервалы и проверена гипотеза о нулевых значениях коэффициентов регрессии. Стандартной ошибкой $\hat{\beta}_j$ является величина $\sigma \sqrt{z_{jj}}$, оцениваемая параметром

$$s_j = s \sqrt{z_{jj}}, \quad j = 0, 1, \dots, k, \quad (4.6)$$

где z_{jj} – диагональный элемент матрицы $Z = (X^T X)^{-1}$. В предположениях модели, приведенных выше, статистика

$$t = \frac{(\hat{\beta}_j - \beta_j) / \sigma \sqrt{z_{jj}}}{s / \sigma} = \frac{\hat{\beta}_j - \beta_j}{s_j}$$

распределена по закону Стьюдента со $(n - k - 1)$ степенями свободы. Поэтому неравенство

$$|\hat{\beta}_j - \beta_j| \leq t_p s_j \quad (4.7)$$

задает доверительный интервал для β_j с уровнем значимости α , если t_p – квантиль уровня $p = \alpha / 2$ распределения Стьюдента.

Для проверки гипотезы $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ (отсутствия какой бы то ни было связи между y и совокупностью факторов) используется статистика

$$F = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / (n - k - 1)} = \frac{SS_R}{SS_E} \cdot \frac{(n - k - 1)}{k},$$

распределенная, если гипотеза H_0 верна, по закону Фишера с k и $n - k - 1$ степенями свободы. Гипотеза H_0 отклоняется, если

$$F > F_\alpha(k, n - k - 1), \quad (4.8)$$

где F_α – квантиль уровня $1 - \alpha$.

Отбор наиболее существенных объясняющих переменных осуществляется по t статистике, при этом принимается тот вариант регрессии, для которого R_{adj}^2 максимален.

Проверку значимости коэффициентов уравнения регрессии проводят при помощи алгоритма проверки статистических гипотез, последовательно рассматривая все рассчитанные коэффициенты выборочного уравнения регрессии β_j , нулевая гипотеза $H_0 : \beta_j = 0$ – гипотеза о равенстве нулю коэффициента генерального уравнения регрессии. В качестве критерия проверки нулевой гипотезы используют критерий Стьюдента (t -критерий). Если же нулевая гипотеза принята, то полагают, что числовой коэффициент генерального уравнения ре-

грессии β_j равен нулю. В этом случае из выборочного уравнения регрессии следует убрать соответствующий член уравнения.

В результате проведения вычислений, соответствующих табл. 4.3, был исследован отклик системы: относительное изменение толщины стенки трубы $(s_{i-1} - s_i)/d_{i-1}$ и относительный катающий диаметр D_k/\bar{D} . Сводная таблица откликов представлена в прил. 2 табл. п.2.1 (для $(s_{i-1} - s_i)/d_{i-1}$) и табл. п.2.2 (для D_k/\bar{D}).

Построение регрессионной модели изменения толщины стенки

Для аппроксимации полиномом второй степени производим дополнительное агрегирование переменных: квадраты независимых переменных и парное произведение независимых переменных (представленных в табл. 4.2).

Для выявления статистически значимых факторов (переменных), входящих в сигнатуру аппроксимируемого полинома, необходимо проанализировать матрицу парной корреляции факторного пространства и функции отклика – изменения толщины стенки трубы, отнесенного к наружному диаметру трубы до деформации. Матрица коэффициентов парной корреляции при уровне значимости $\alpha = 0,05$ приведена в прил. 2 табл. п.2.3.

Можно сказать, что факторы: x_2 , x_3 , x_6 не являются статистически значимыми для случая $\alpha = 0,05$.

Таким образом, значимыми факторами для построения регрессионной модели при изменении толщины стенки трубы при деформации являются факторы x_1 , x_4 , x_5 , x_1^2 , x_4^2 , x_5^2 , $x_1 \cdot x_2$, $x_1 \cdot x_3$, $x_1 \cdot x_4$, $x_1 \cdot x_5$, $x_1 \cdot x_6$, $x_2 \cdot x_4$, $x_2 \cdot x_5$, $x_4 \cdot x_5$, $x_4 \cdot x_6$, $x_5 \cdot x_6$.

В табл. 4.5 приведены оценки значимости коэффициентов регрессии, их ошибки и основные статистики для соответствующих переменных.

Для этого случая: $R_{adj}^2 = 0,91570464$; $F(16,64)=55,315$; уровень значимости $\alpha = 0,0000002$; стандартная ошибка 0,00273.

В столбце β_j находятся оценки неизвестных коэффициентов $\hat{\beta}_j$, вычисленные по формуле (4.4). Стандартные ошибки s_j , вычисленные по формуле (4.6), также представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Коэффициенты регрессии и их оценки

Фактор	β_j	s_j	$t(64)$	α
Свободный член	-0,04120	0,00710	-5,80617	0,00000
X1	0,19778	0,03056	6,47253	0,00000
X4	0,32127	0,06770	4,74515	0,00001
X5	0,08336	0,02089	3,98978	0,00017
X1^2	-0,17600	0,06445	-2,73102	0,00815
X4^2	-0,62956	0,25778	-2,44223	0,01737
X5^2	-0,04297	0,01611	-2,66723	0,00968
X1*X2	-0,00007	0,00072	-0,09223	0,92680
X1*X3	0,00124	0,00055	2,26734	0,02676
X1*X4	-0,77689	0,09114	-8,52426	0,00000
X1*X5	-0,20588	0,02279	-9,03569	0,00000
X1*X6	-0,02184	0,02163	-1,00952	0,31653
X2*X4	0,00019	0,00135	0,13916	0,88976
X2*X5	-0,00004	0,00025	-0,14553	0,88475
X4*X5	-0,27970	0,04590	-6,09392	0,00000
X4*X6	-0,00304	0,04039	-0,07530	0,94021
X5*X6	-0,00139	0,00759	-0,18314	0,85527

В столбце $t(64)$ указаны значения статистики Стьюдента (4.7) для проверки гипотезы H_0 о равенстве нулю соответствующего коэффициента.

Анализируя доверительные интервалы и выполняя проверку гипотезы о нулевых значениях коэффициентов регрессии, можно прийти к выводу, что переменные регрессионной функции: $x1 \cdot x2$, $x1 \cdot x6$, $x2 \cdot x4$, $x2 \cdot x5$, $x4 \cdot x6$, $x5 \cdot x6$ являются несущественными, так как α превышает принятый в расчетах уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Строим уравнение регрессии с отбрасыванием выявленных несущественных членов уравнения регрессии. В табл. 4.5 приведены оценки значимости коэффициентов регрессии, их ошибки и основные статистики для соответствующих переменных для второго скорректированного случая.

Таблица 4.5

Коэффициенты регрессии и их оценки

Фактор	β_j	s_j	$t(64)$	α
Свободный член	-0,041203	0,007126	-5,78195	0,000000
X1	0,183877	0,025962	7,08255	0,000000
X4	0,321691	0,060740	5,29618	0,000001
X5	0,082085	0,020333	4,03702	0,000137
X1^2	-0,176000	0,064715	-2,71963	0,008236
X4^2	-0,629556	0,258858	-2,43205	0,017575
X5^2	-0,042972	0,016179	-2,65611	0,009782
X1*X3	0,001244	0,000551	2,25789	0,027073
X1*X4	-0,776889	0,091520	-8,48871	0,000000
X1*X5	-0,205875	0,022880	-8,99800	0,000000
X4*X5	-0,279700	0,046091	-6,06850	0,000000

Для этого случая: $R_{adj}^2 = 0,91499708$; $F(10,70)=87,114$; уровень значимости $\alpha = 0,0000002$; стандартная ошибка 0,000245.

Для проверки гипотезы H_0 о равенстве нулю всех коэффициентов служит значение статистики (4.8) F и его уровень значимости p . Гипотеза отвергается, так как α не превышает принятый в расчетах уровень значимости $\alpha = 0,05$. Регрессия признается значимой.

Во втором случае незначительно уменьшился скорректированный коэффициент детерминации и коэффициент стандартной детерминации, что говорит о более низком уровне подгонки опытных данных к модели, но в тоже время уменьшилось значение стандартной ошибки модельных значений (на 10 %). Таким образом, стоит принять следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta s}{d_{i-1}} = & -0,041203 + 0,183877 \cdot \varepsilon_{\varnothing} + 0,321691 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} + 0,082085 \cdot z_{i-1} - 0,176 \cdot \varepsilon_{\varnothing}^2 - \\
& - 0,629556 \cdot \left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right)^2 - 0,042972 \cdot z_{i-1}^2 + 0,001244 \cdot \varepsilon_{\varnothing} \cdot v - 0,776889 \cdot \varepsilon_{\varnothing} \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} - \\
& - 0,205875 \cdot \varepsilon_{\varnothing} \cdot z_{i-1} - 0,2797 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \cdot z_{i-1},
\end{aligned} \tag{4.9}$$

где коэффициент при члене уравнения $\varepsilon_{\varnothing} \cdot v$ имеет размерность [с/м].

Для анализа ошибок необходимо построить гистограмму распределения ошибок (остатков). Гистограмма показана на рис. 4.31.

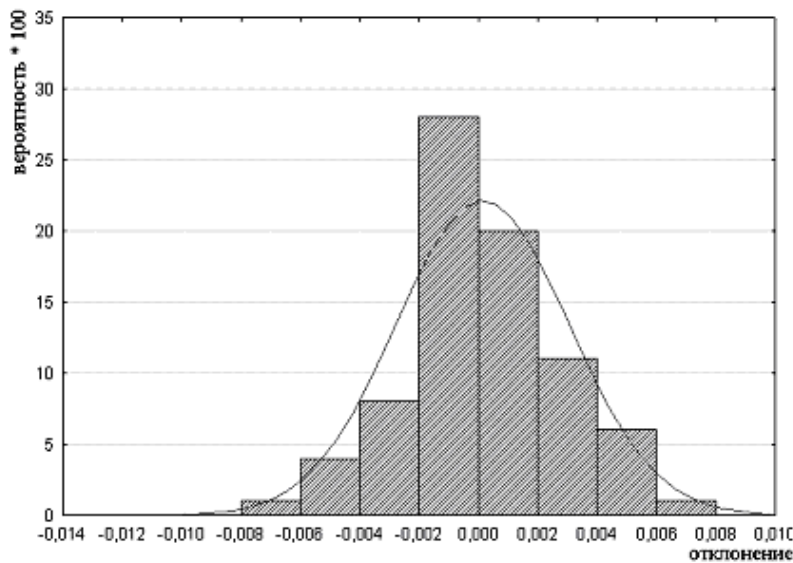


Рис. 4.31. Гистограмма распределения дисперсионных остатков

Видно, что гистограмма неплохо описывается нормальной кривой. Предположение о нормальности остатков можно считать выполненным. Нет резко выделяющихся остатков и нет закономерности в их поведении. Заключительно можно утверждать, что модель (4.9) достаточно адекватно описывает экспериментальные данные. Таким образом, построена модель, описывающая поведение толщины стенки при прокатке в клетки редуционно-растяжного стана.

Результаты расчета по зависимости (4.9) для процесса редуцирования с обжатием $\varepsilon_{\varnothing} = 5...25\%$, натяжением $z_{i-1} = 0,4...0,8$, окружной скоростью вала по среднему диаметру $v = 2...10$ м/с и геометрическим параметром исходной трубы $s_{i-1}/d_{i-1} = 0,05...0,15$ представлены на рис. 4.32–4.36.

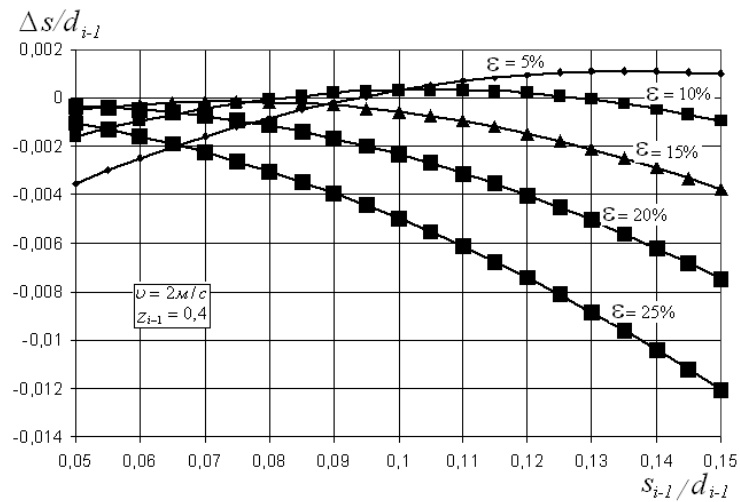


Рис. 4.32. Зависимость изменения толщины стенки трубы при фиксированных параметрах $v = 2 \text{ м/с}$ и $z_{i-1} = 0,4$

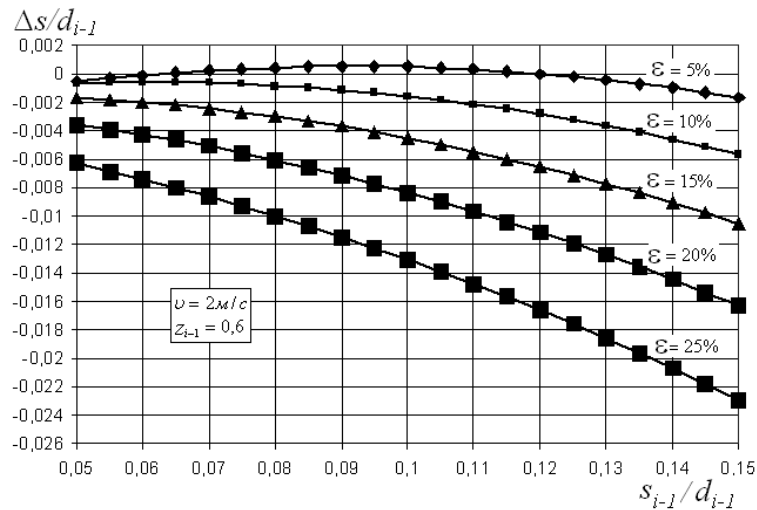


Рис. 4.33. Зависимость изменения толщины стенки трубы при фиксированных параметрах $v = 2 \text{ м/с}$ и $z_{i-1} = 0,6$

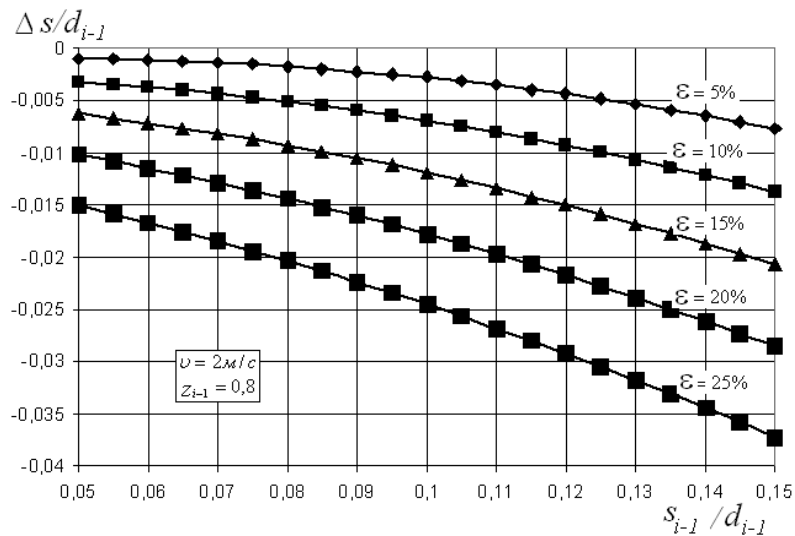


Рис. 4.34. Зависимость изменения толщины стенки трубы при фиксированных параметрах $v = 2 \text{ м/с}$ и $z_{i-1} = 0,8$

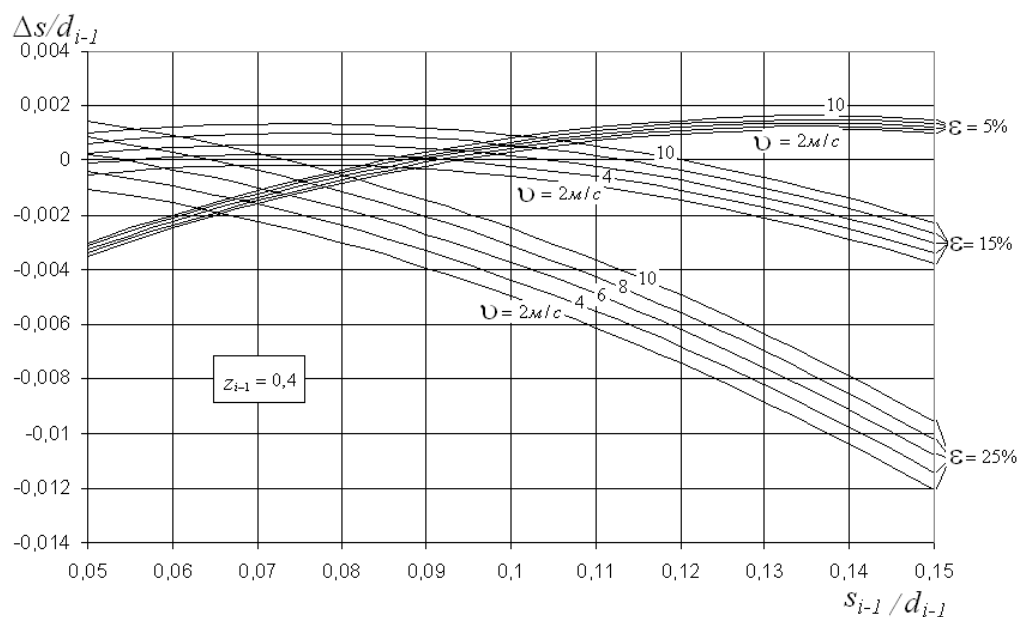


Рис. 4.35. Зависимость изменения толщины стенки трубы при фиксированных параметрах $z_{i-1} = 0,4$

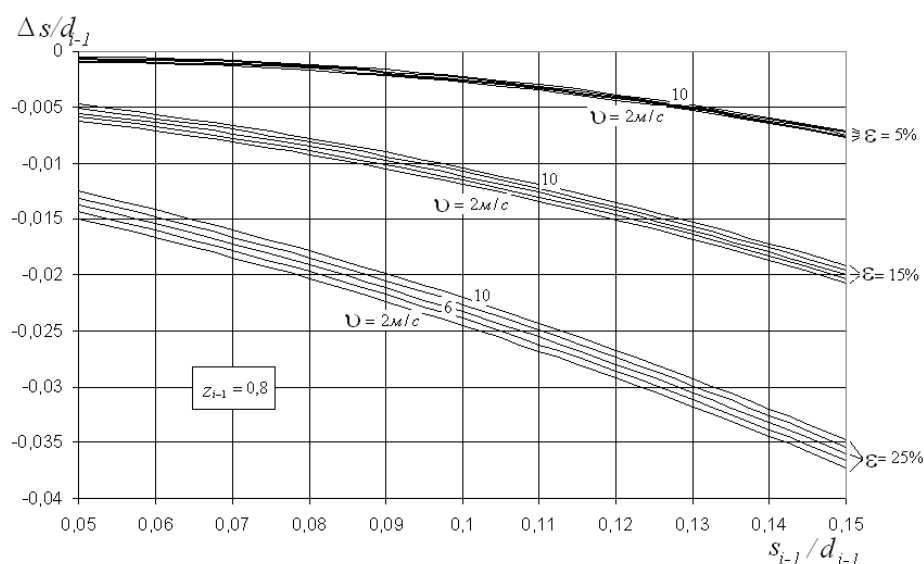


Рис. 4.36. Зависимость изменения толщины стенки трубы при фиксированных параметрах $z_{i-1} = 0,8$

Оценим полученные результаты, анализируя графики (рис. 4.32–4.36). Критическим отношением называется такое отношение $(s_{i-1}/d_{i-1})^{кр}$, при котором деформация трубы не сопровождается изменением толщины стенки. Величина критического отношения зависит от обжатия трубы по диаметру, заднего натяжения трубы и в малой степени зависит от скорости вращения валков. Как видно из вышеприведенных графиков, при натяжениях больше 0,6 происходит

уменьшение толщины стенки трубы практически при всех значениях величины относительного обжатия трубы по диаметру, таким образом можно сказать, что такого критического отношения не существует. При натяжениях меньше 0,6 и относительных обжатиях по диаметру $\varepsilon_{\varnothing} = 0,05 \dots 0,15$ величина критического отношения находится в пределах $(s_{i-1}/d_{i-1})^{кр} = 0,09 \dots 0,12$. При этом с ростом величины относительного обжатия трубы по диаметру величина критического отношения уменьшается. Влияние скорости прокатки на величину критического отношения необходимо рассматривать в двух диапазонах: при обжатии меньше 10 % с увеличением скорости величина критического отношения несколько уменьшается, а при обжатии больше 10 % величина критического отношения возрастает с увеличением скорости.

Построение регрессионной модели зависимости катающего диаметра

Скорость выхода металла из валков при прокатке в калибрах определяется величиной катающего диаметра D_k . Катающий диаметр определяется точкой на критической линии в сечении выхода металла из калибра. Для построения регрессионной зависимости катающего диаметра от основных параметров прокатки целесообразно ввести безразмерную характеристику, определяющую катающий диаметр. Такой характеристикой может служить отношение катающего диаметра к среднему диаметру конического валка D_k/\bar{D} . Средний диаметр конического валка определяется как среднее между максимальным диаметром и минимальным диаметром валка $\bar{D} = 0,5 \cdot (D_b^{max} + D_b^{min})$. Таким образом, безразмерный показатель D_k/\bar{D} принимает значение: равное 1 в том случае, если катающий диаметр совпадает со средним диаметром валка; больше 1, если катающий диаметр смещен в сторону большего диаметра валка, и наоборот.

Для аппроксимации полиномом второй степени производим дополнительное агрегирование переменных: квадраты независимых переменных и парное произведение независимых переменных (представленных в табл. 4.2). Век-

тор столбец безразмерного параметра катающего диаметра приведен в прил. 2 табл. п.2.2.

Для выявления статистически значимых факторов (переменных), входящих в сигнатуру аппроксимируемого полинома, необходимо проанализировать матрицу парной корреляции факторного пространства и функции отклика – отношение катающего диаметра к среднему диаметру вала. Матрица коэффициентов парной корреляции при уровне значимости $\alpha = 0,05$ приведена в прил. 2 табл. п.2.4.

Можно сказать, что факторы: x_2 , x_3 , x_6 не являются статистически значимыми для случая $\alpha = 0,05$.

В табл. 4.6 приведены оценки значимости коэффициентов регрессии, их ошибки и основные статистики для соответствующих переменных.

Таблица 4.6

Коэффициенты регрессии и их оценки

Фактор	β_j	s_j	$t(64)$	α
Свободный член	0,981381	0,001173	836,4714	0,000000
X4	0,260000	0,025929	10,0273	0,000000
X1^2	0,172085	0,013154	13,0825	0,000000
X4^2	-0,400000	0,128317	-3,1173	0,002588
X1*X2	-0,112874	0,000177	-2,4584	0,006265
X1*X5	0,060241	0,005158	11,6788	0,000000

Для этого случая: $R_{adj}^2 = 0,98257366$; $F(10,70)=87,114$; уровень значимости $\alpha = 0,0000002$; стандартная ошибка 0,0000136.

Для проверки гипотезы H_0 о равенстве нулю всех коэффициентов служит значение статистики (4.8) F и его уровень значимости α . Гипотеза отвергается, так как α не превышает принятый в расчетах уровень значимости $\alpha = 0,05$. Регрессия признается значимой.

Таким образом, стоит принять следующее уравнение регрессии:

$$\frac{D_k}{\bar{D}} = 0,981381 + 0,26 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} + 0,172085 \cdot \varepsilon_{\varnothing}^2 - 0,4 \cdot \left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right)^2 - 0,112874 \cdot \varepsilon_{\varnothing} \cdot A + 0,060241 \cdot \varepsilon_{\varnothing} \cdot z_i. \quad (4.10)$$

Для анализа ошибок необходимо построить гистограмму распределения ошибок (остатков). Гистограмма показана на рис. 4.37.

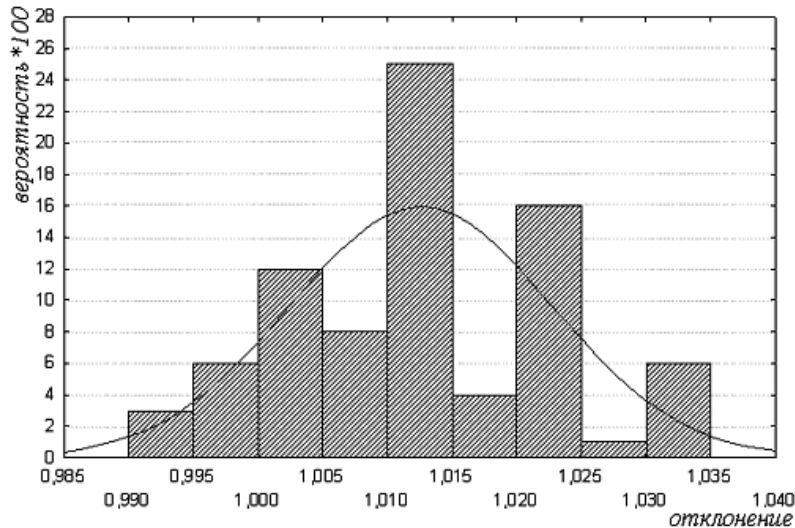


Рис. 4.37. Гистограмма распределения дисперсионных остатков

Видно, что гистограмма неплохо описывается нормальной кривой. Предположение о нормальности остатков можно считать выполненным. Нет резко выделяющихся остатков и нет закономерности в их поведении. Заключительно можно утверждать, что модель (4.10) достаточно адекватно описывает экспериментальные данные. Таким образом, построена модель, описывающая поведение катающего диаметра при прокатке в клетки редуционно-растяжного стана.

Результаты расчета по зависимости (4.10) для процесса редуцирования с обжатием $\varepsilon_{\varnothing} = 5...25\%$, натяжением $z_i = 0,4...0,8$, относительным диаметром валка $A = 6...18$ и геометрическим параметром исходной трубы $s_{i-1}/d_{i-1} = 0,05...0,15$ представлены на рис. 4.38-4.40.

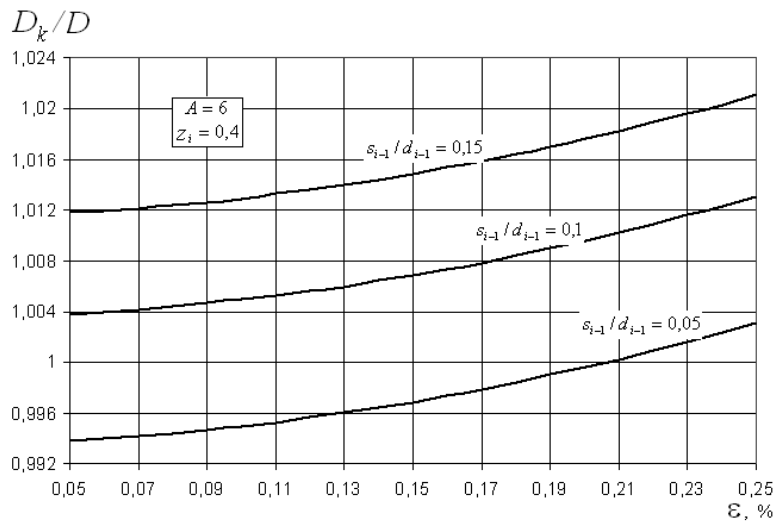


Рис. 4.38. Зависимость катающего диаметра от обжатия по диаметру и исходной геометрии трубы

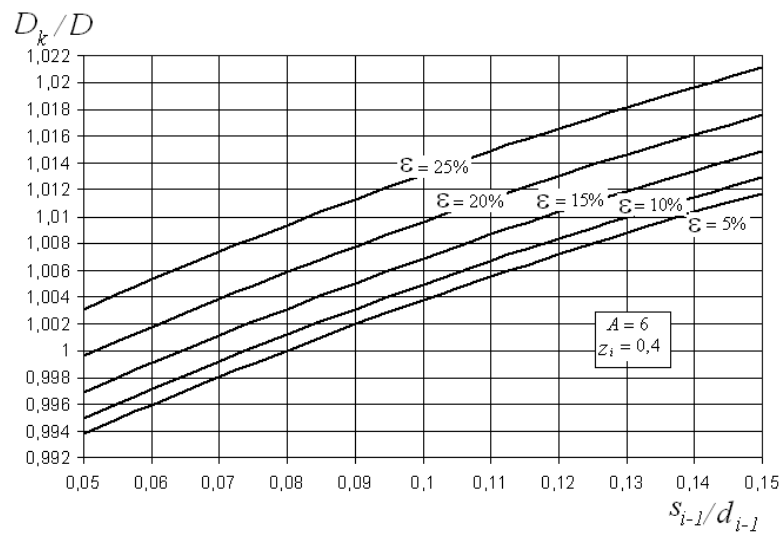


Рис. 4.39. Зависимость катающего диаметра от обжатия по диаметру и исходной геометрии трубы

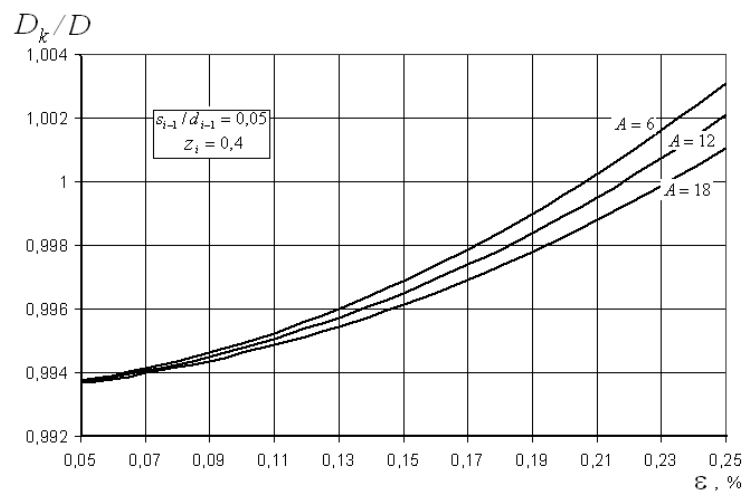


Рис. 4.40. Зависимость катающего диаметра от обжатия по диаметру и относительного диаметра вала

4.6. Сопоставление опытных и расчетных данных математических моделей прокатки в калибрах конических валков

Частичная проверка адекватности предложенной в разделе 4.1 модели процесса прокатки в четырехвалковом калибре, образованном коническими бочками валков, осуществлена на опытной, описанной выше, установке при прокатке свинцовых полос круглого и квадратного сечения. В частности, эксперимент позволяет сопоставить опытные и расчетные данные по энергосиловым параметрам прокатки по схеме круг–квадрат.

Экспериментально определены усилия прокатки при $A = 6,5$ в диапазоне изменения вытяжек от 1,07 до 1,52. Методом осадки на гладких смазанных бойках определено сопротивление деформации σ_s при степенях и скоростях деформации, реализуемых при опытной прокатке. С целью сопоставления опытных и расчетных данных по представленной здесь математической модели проведен расчет усилия прокатки при значениях параметров, совпадающих с экспериментальными. Неизвестный коэффициент трения ψ при расчете варьировался от 0,4 до 0,8. Наилучшее совпадение с опытными данными достигнуто при $\psi = 0,6$. Результаты сопоставления приведены на рис. 4.41. Кривая 1 является полиномиальной аппроксимацией опытных значений, выполненной методом наименьших квадратов ($R^2 = 0,9478$).

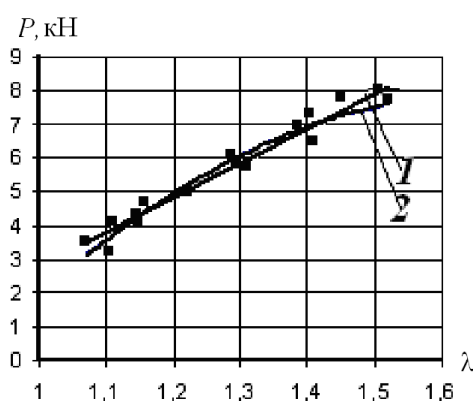


Рис.4.41. Сопоставление опытных (1) и расчетных (2) данных по усилию прокатки по схеме круг–квадрат

Для сопоставления опытных и расчетных значений моментов прокатки результаты замеров нанесены на график рис. 4.42, где сплошной кривой пред-

ставлены расчетные значения момента прокатки, полученные по описанной методике (см. п.4.1).

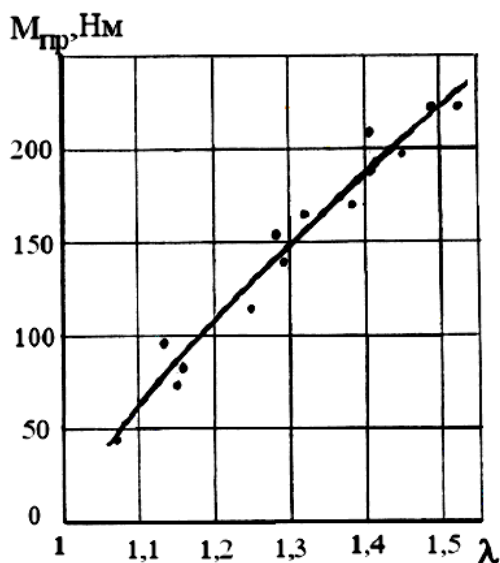


Рис.4.42. Сопоставление опытных (точки) и расчетных (кривая) значений суммарного момента прокатки по схеме круг-квадрат при постоянном относительном диаметре $A = 6,5$ и $\psi = 6$

Если аппроксимировать функцию $M_{п}(\lambda)$, представляющую опытные данные, методом наименьших квадратов полиномом второго порядка, то аппроксимирующая кривая практически совпадает с графиком аналитически построенной функции, если принять $\psi = 0,6$. Показать справедливость принятого допущения по контактным условиям трения, к сожалению, не представилось возможным.

Прокатка с минеральным маслом типа И-20 и на сухих обезжиренных и замененных валках показывает различие в крутящих моментах не более 15 %, а в усилиях прокатки – не более 10 %. Проверку удалось провести лишь с вытяжками до 1,2, поскольку при прокатке с маслом с большими вытяжками возникают проблемы захвата полосы валками даже при заковке задаваемого конца полосы.

Эксперименты, проведенные на прокатке круглых и квадратных полос соответственно в квадратном и круглом калибрах, показали некоторое отличие опытных (рис. 3.17) и расчетных (рис. 4.6) значений катающих диаметров. Результаты достаточно тщательного замера значений катающих диаметров пред-

ставлены после статистической обработки графически на рис. 3.17. Здесь катающий диаметр D_k представлен в безразмерном виде параметром

$$\eta = 1 - \frac{D - D_k}{a\sqrt{2}},$$

который при $D_k = \bar{D}$ принимает значения 0,5 при $D_k = D$ – значение 1 и при минимальном диаметре в зоне обжатия – значение 0.

Удовлетворительное совпадение опытных и расчетных значений катающих диаметров при прокатке на валках с относительным диаметром $A = 6,5$ и с коэффициентом трения, близким к $\psi = 0,6$, наблюдается лишь при вытяжках более 1,3. В диапазоне λ от 1,15 до 1,3 расчетные значения занижены (реальная критическая линия смещена в сторону большего диаметра вала), а при $\lambda < 1,15$ – завышены, то есть точка k на рис. 4.1 смещена влево. Следует отметить, что выборочно замеренные значения D_k при прокатке по схеме круг-квадрат с заневоливанием входящего конца полосы отклоняются от расчетных не более чем на 10 % в диапазоне вытяжек от 1,1 до 1,45. За пределами этого диапазона проверка не проводилась.

Упрощенная описанная аналитическая модель очага деформации при прокатке на конических валках по схеме круг-квадрат не позволяет определить реальные углы скручивания полосы в зоне обжатия. Экспериментально же эти углы определяются просто и достаточно точно методом торцевых рисок, нанесенных на образцы заданной длины. На графике (рис. 3.12) приведены результаты замера углов скручивания полосы круглого сечения, приведенных к единице длины (1 мм) очага деформации l . Конические валки диаметром $D = 130$ мм образуют квадратный калибр со стороной $a = 18$ мм. Вытяжка варьируется изменением исходного диаметра полос. Методом рисок замерялся удельный угол скручивания полосы в зоне обжатия ϕ , а по развороту граней прокатанной полосы замерялся остаточный угол скручивания γ , также приводимый к единице длины зоны обжатия. Остаточное скручивание появляется всегда при отсутствии заневоливания выходящего конца полосы. Момент зане-

воливания переднего конца полосы определяется выражением [146]: $M = 0,2\tau_{s1}a^3$, где τ_{s1} – сопротивление сдвиговой деформации металла на выходе из валков. Удельный остаточный угол скручивания полос $\gamma \cdot 10^{-2}$ град/мм в зависимости от вытяжки приведен графике рис. 3.12.

Определение суммарного удельного угла скручивания по опытным данным, приведенным на рис. 3.12 и 3.13, сложением γ и φ показывает удовлетворительное совпадение опытных и расчетных данных, приведенных на рис. 4.13, при $A = 6,5$.

Безразмерный коэффициент момента прокатки $K_M = 0,25 \pm 0,08$, полученный при опытной прокатке свинцовых образцов по схеме круг-квадрат, соответствует расчетным значениям коэффициента m , приведенным на рис. 4.9 при $A = 6,5$ и $\psi = 0,8$.

В итоге можно сделать вывод о пригодности аналитически полученных в разделе 4.1 формул для расчета энергосиловых параметров прокатки (усилия и момента), углов скручивания полос в зоне обжатия и катающих диаметров при прокатке по схеме круг–квадрат. Стоит отметить, что упрощенная математическая модель не позволяет при определении угла скручивания заготовки выделить из полного угла остаточный угол скручивания, который определяет угловое положение калибра следующей клетки непрерывной группы или блока. Как уже отмечалось, применение гидропривода валков позволяет устанавливать любые схемы клеток. Поэтому в случае непрерывной прокатки по схеме круг–квадрат–круг клеть с круглым четырехвалковым калибром необходимо развернуть по отношению к предыдущему калибру под углом $30^\circ + \gamma \cdot L_k$, где L_k – межклетевое расстояние в непрерывной группе. Единственная возможность определения углов γ при технологическом проектировании – использование результатов решения задачи прокатки в конечно-элементной постановке. Кроме того, несмотря на трудоемкость и длительность решений МКЭ, к ним вынужденно следует прибегать при расчете степени заполнения калибров, катающих диаметров и вытяжек, что необходимо для скоростного согласования приводов

клетей непрерывных групп и блоков. Грубое допущение линейного распределения диаметров описанной вокруг сечений профиля окружностей не дает возможности во всех случаях правильно определять степени заполнения калибров, особенно при отсутствии априорной информации о формоизменении в конкретных вариантах прокатки.

Упрощенная математическая модель разработана только для схемы прокатки круг–квадрат, где аппроксимация границы контактной поверхности параболой оказалась достаточно приемлемой и позволила удовлетворительно рассчитать энергосиловые параметры, полные углы скручивания заготовки и катающие диаметры при коэффициентах вытяжки $\lambda > 2,0 \dots 2,5$. Применением аналогичной процедуры не удалось решить задачи расчета формоизменения и силовых параметров прокатки по схеме квадрат–круг, квадрат–квадрат и круг–круг в калибрах конических валков. В постановке этих задач МКЭ меняется лишь геометрическая постановка. Кроме того, МКЭ позволяет без особых методических трудностей ставить связанную задачу и рассчитывать как напряженно-деформированное состояние полосы, так и температурные поля заготовки и валков. Правда, решение таких связанных задач при достаточно большом количестве конечных элементов существенно удлиняет расчетную процедуру, делая порой достижение конечных пригодных для технологического использования результатов практически нереальным.

Проверка адекватности конечно-элементной модели процесса прокатки в калибрах конических валков может быть выполнена для какой-либо одной схемы прокатки, поскольку в остальных схемах физическая и математическая постановки остаются теми же. Геометрическая постановка современными графическими средствами не представляет принципиальных трудностей и не дает повода сомневаться в качестве решения.

Наибольшее количество опытной информации получено для схемы прокатки круг–квадрат, поэтому сопоставление экспериментальных и расчетных МКЭ данных целесообразно провести для этой схемы прокатки. Опыты прово-

дились на свинцовых образцах, что вынуждает при постановке задачи МКЭ воспроизвести, по возможности, условия проведения экспериментов.

Зависимость величины сопротивления деформации от степени деформации при постоянной скорости деформации и постоянной температуре $t = 20^0\text{C}$ была задана таблично в соответствии со следующими зависимостями:

$$\text{- для } \xi = 0,005\text{c}^{-1} - \sigma_s = 17,50 + 80,38\varepsilon - 156,231\varepsilon^2;$$

$$\text{- для } \xi = 0,01\text{c}^{-1} - \sigma_s = 19,56 + 89,87\varepsilon - 174,68\varepsilon^2;$$

$$\text{- для } \xi = 0,015\text{c}^{-1} - \sigma_s = 20,89 + 95,93\varepsilon - 186,46\varepsilon^2;$$

$$\text{- для } \xi = 0,02\text{c}^{-1} - \sigma_s = 21,88 + 100,48\varepsilon - 195,29\varepsilon^2;$$

$$\text{- для } \xi = 0,025\text{c}^{-1} - \sigma_s = 22,68 + 104,15\varepsilon - 202,44\varepsilon^2,$$

где $\varepsilon = \ln(\lambda)$ – степень деформации. В расчетный модуль задавалось пять точек с шагом степени деформации 0,1, между точками кривой упрочнения происходила интерполяция по линейному закону. Модуль упругости при температуре 20^0C принимался равным 18,2 ГПа.

Частота вращения валков составляла $n = 0,3$ об/мин.

Трение в контакте между валками и металлом описывалось по Зибелю: $\tau = \psi\tau_s$, при этом ψ принималось равным 0,6 и 0,8. Максимальный диаметр валков в калибрах $D = 130$ мм. Сторона квадрата калибра $a = 18$ мм. Относительный диаметр валка $A = \frac{D + D_1}{2a} = 6,5$. Проектируемая вытяжка $\lambda = \frac{\pi d^2}{2a^2}$ (при

полном заполнении калибра) принималась равной: 1,2; 1,3; 1,4; 1,5 при этом диаметр исходной заготовки d принимался равным 22,26 мм; 23,17 мм; 24,04 мм; 24,9 мм соответственно. Действительная вытяжка рассчитывалась как $\lambda = \frac{V_1}{V_0}$, где V_0 и V_1 – скорость полосы соответственно на входе и выходе зоны обжатия.

В первую очередь, формоизменение характеризуется степенью заполнения δ квадратного калибра и функцией связи коэффициента высотной дефор-

мации $1/\eta$ и коэффициента вытяжки λ . Опытные и расчетные значения δ от $1/\eta$ приведены на рис. 4.43.

Расчеты выполнены при показателях трения (по Зибелю) 0,6 и 0,8. В случае $\psi = 0,7$ достигается полное совпадение опытных и расчетных значений степени заполнения калибра при прокатке по схеме круг-квадрат.

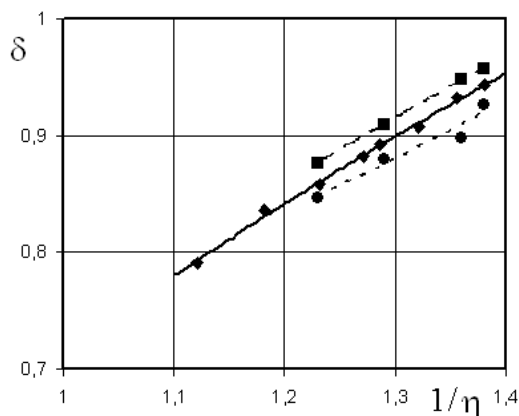


Рис. 4.43. Степени заполнения квадратного калибра конических валков:
 ♦ – опытные данные; ■ – МКЭ при $\psi = 0,6$; ● – МКЭ при $\psi = 0,8$

При коэффициентах высотной деформации $1/\eta > 1,25$ совпадение экспериментальных значений коэффициента вытяжки λ с полученными МКЭ при $\psi = 0,6$ вполне удовлетворительное, что иллюстрирует рис. 4.44.

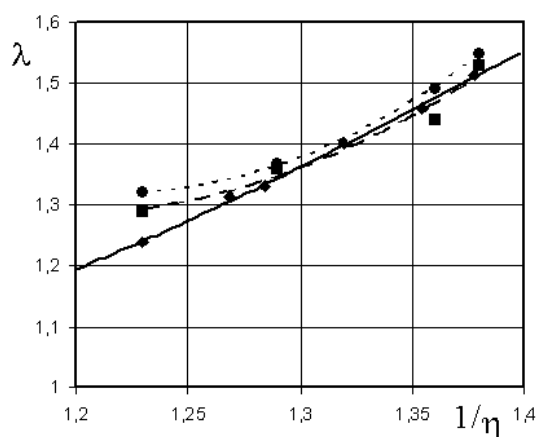


Рис. 4.44. Зависимость коэффициента вытяжки от коэффициента высотной деформации для схемы круг-квадрат: ♦ – опытные данные; ■ – МКЭ при $\psi = 0,6$; ● – МКЭ при $\psi = 0,8$

Более сложная ситуация в сопоставлении опытных и расчетных данных характерна для определения катающих диаметров, представленных безразмерным параметром η (рис. 4.45).

Удовлетворительное совпадение значений η наблюдается при $\psi = 0,8$ в достаточно узком диапазоне изменения λ от 1,25 до 1,4. Размер катающего диаметра при прокатке в квадратном калибре конических валков в значительной степени определяется контактными условиями трения, которые трудно сохранить постоянными при прокатке достаточно большой партии образцов.

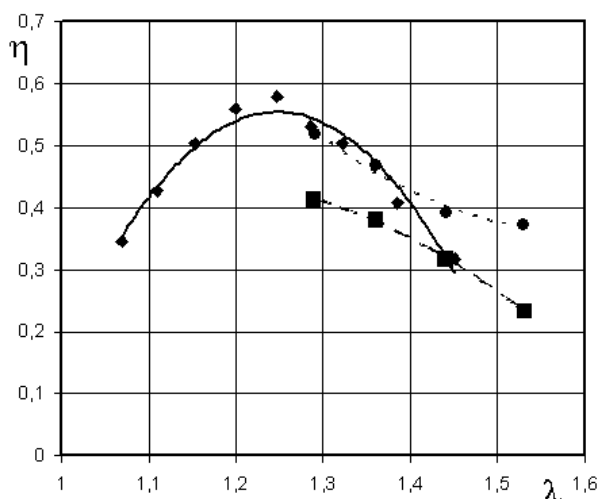


Рис. 4.45. Относительный катающий диаметр для схемы круг–квадрат:
 ◆ – опытные данные; ■ – МКЭ при $\psi = 0,6$; ● – МКЭ при $\psi = 0,8$

При расчете МКЭ коэффициент трения сохраняется постоянным при любых значениях λ , что трудно обеспечить при проведении экспериментов.

При расчете МКЭ достигнуто полное совпадение с опытными значениями удельных углов скручивания заготовки в зоне обжатия, по крайней мере в диапазоне изменения коэффициентов вытяжки от 1,25 до 1,53 (рис. 4.46) при $\psi = 0,8$. С уменьшением ψ , в частности до 0,6, уменьшается угол скручивания, что также наблюдалось при проведении экспериментов. В опытах удельное скручивание всегда возрастало после протирки образцов ацетоном и применения мела в качестве абразивного покрытия.

Что касается расчетного определения остаточных углов скручивания полос, то, как следует из рис. 4.47, совпадение с опытными значениями γ значительно хуже. Можно лишь наблюдать качественный характер зависимости γ от λ . Опытное определение γ затруднено из-за изгиба полос на выходе из валков, что может провоцировать экспериментальные ошибки.

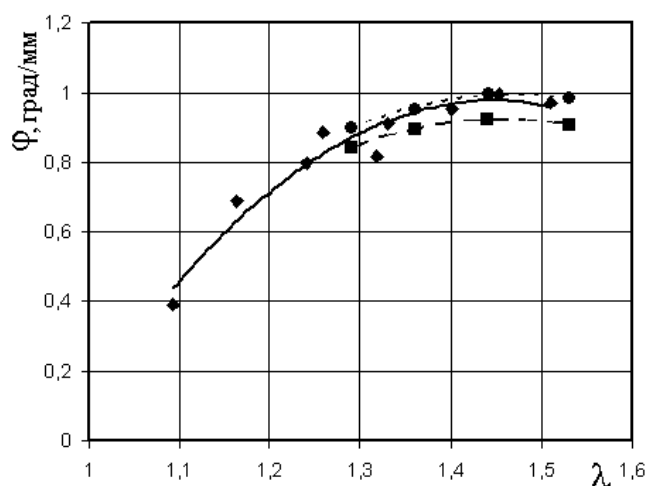


Рис. 4.46. Удельные (на 1 мм длины очага деформации) углы скручивания полосы в зоне обжатия при прокатке по схеме круг-квадрат
 ◆ – опытные данные; ■ – МКЭ при $\psi = 0,6$; ● – МКЭ при $\psi = 0,8$

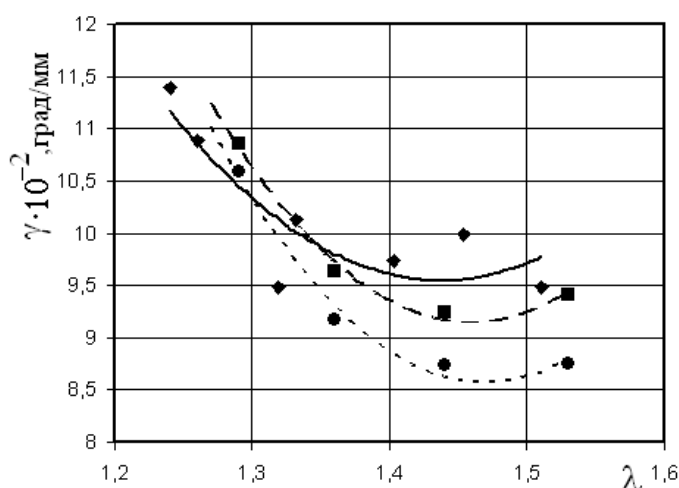


Рис. 4.47. Удельные остаточные углы скручивания полосы после прокатки в квадратном калибре конических валков по схеме круг-квадрат:
 ◆ – опытные данные; ■ – МКЭ при $\psi = 0,6$; ● – МКЭ при $\psi = 0,8$

Наиболее близки к опытным значения, полученные МКЭ при $\psi = 0,8$.

Для описания закономерностей прокатки труб в круглом калибре конических валков использована математическая модель, построенная в результате вычислительного эксперимента на базе конечно-элементной постановки. Для сопоставления опытных и расчетных данных может быть рассмотрена экспериментально построенная зависимость относительного катающего диаметра

$$\bar{D}_k = \frac{\bar{D} - D_k}{\bar{D}} \cdot 100 \% \text{ от относительной исходной толщины стенки, представленная на рис. 3.24.}$$

Для расчета \bar{D}_k по уравнению регрессии, полученному по данным вычислительного эксперимента, в качестве независимых параметров рассмотрено относительное обжатие по диаметру $\varepsilon = \Delta d/d_0$, относительная исходная толщина стенки трубы s_0/\bar{d} и относительный диаметр валков $A = \bar{D}/d$. Уравнение в этом случае выглядит следующим образом:

$$\bar{D}_k = \left[0,01862 + 0,26 \frac{s_0}{\bar{d}} + 0,172085 \varepsilon^2 - 0,4 \left(\frac{s_0}{\bar{d}} \right)^2 - 0,11287 \cdot \varepsilon \cdot A \right] \cdot 100 \% .$$

Расчетные и опытные данные для прокатки при $A = 4,75$ представлены на рис. 4.48.

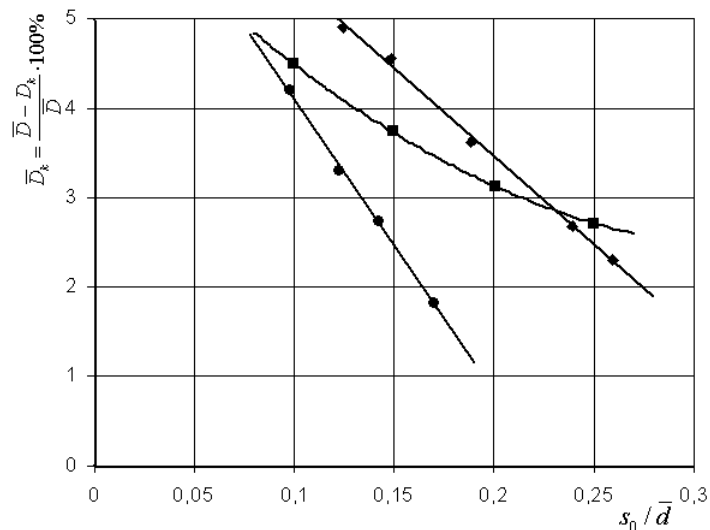


Рис. 4.48. Опытные и расчетные значения относительного катающего диаметра в зависимости от относительной исходной толщины стенки трубы: ♦ – опытные данные при $\varepsilon = 0,11 \dots 0,12$; ● – опытные данные при $\varepsilon = 0,08 \dots 0,09$; ■ – расчетные данные при $\varepsilon = 0,1$

По крайней мере качественно опытные и расчетные зависимости одинаково отражают зависимость \bar{D}_k от s_0/\bar{d} . Количественное расхождение не столь велико, чтобы отказаться от практического использования математической модели процесса прокатки труб в круглых калибрах конических валков.

Выполненное сопоставление опытных и расчетных данных показало удовлетворительное совпадение и, следовательно, адекватность созданных математических моделей процессов прокатки в калибрах конических валков. При технологическом проектировании целесообразно пользоваться упрощенной

инженерной методикой (см. п.4.1) при расчете энергосиловых параметров и математической моделью в конечно-элементной постановке – при определении характеристик формоизменения и катающих диаметров.

Поскольку прокатные клетки, прокатка на которых исследована в настоящей работе, предназначены для встраивания в непрерывный прессово-прокатный агрегат, все технологические расчеты усложняются из-за сложного характера изменения сопротивления деформации и температуры обрабатываемой заготовки. Как бы ни были совершенны математические модели многовалковой прокатки, они становятся бесполезны при невозможности описания изменения σ_s в результате динамического разупрочнения металла в паузах между актами горячего деформирования, то есть при движении полосы или трубы между прессом и первой прокатной клетью и в межклетевых промежутках. Как прессование, так и прокатка прутков и труб в соответствии с технологической постановкой (см. п.1.2) осуществляется при температурах явно превосходящих температуру начала рекристаллизации, поскольку после завершения прокатки изделия из аустенитной стали производится его закалка с нагрева 1000...1050⁰С. Температура, степень и скорость деформации повышают скорости динамических полигонизации и рекристаллизации [147]. Определить, при каком значении σ_s начнется сортовая или редуционная прокатка после завершения прессования и паузы перед началом прокатки, можно лишь зная функцию разупрочнения.

Далеко не все методы пластометрических исследований позволяют измерять сопротивление больших пластических деформаций, характерных для прессования. При растяжении степени деформации до нарушения однородности деформации настолько малы, что не пригодны даже для построения зависимостей $\sigma_s(\epsilon)$, которые могут быть применены при решении задач прокатки. Тем более растяжение не подходит для анализа циклических деформаций. Методом осадки также сложно анализировать многоцикловую осадку из-за нарастающего от цикла к циклу негативного влияния контактного трения на результаты замера

сопротивления деформации. Степени деформации, реализуемые при прессовании даже со сравнительно небольшими вытяжками, вообще недостижимы при испытаниях на осадку. Циклическая осадка на пластометрах для изучения динамического разупрочнения не позволяет стабилизировать температурный режим при испытаниях. Единственно пригодным способом пластометрических испытаний при больших степенях деформации является кручение, осуществляемое на торсионных пластометрах [147]. Все известные из доступных литературных источников конструкции торсионных пластометров и методики проведения на них пластометрических исследований мало пригодны для определения сопротивления большим горячим пластическим деформациям, зависящего от степени деформации в значительной степени даже при условии удовлетворительной стабилизации температуры во время испытаний. При больших степени деформации сдвига γ и скорости деформации ξ и, в общем случае, нелинейном распределении τ_s по радиусу образца определение сопротивления деформации сдвига по замеренным величинам угла скручивания образца и приложенного крутящего момента невозможно без привлечения некоторых гипотез, упрощающих реальную схему напряженно-деформированного состояния образца при упруго-пластическом кручении.

С целью создания научно-методических предпосылок к технологическому проектированию совмещенного процесса прессования–непрерывной сортовой или редуccionной прокатки в рамках проблематики настоящей работы спроектирован и изготовлен торсионный пластометр, реализующий известный [147] дифференциальный метод Мура. Фотография пластометра приведена на рис. 4.49.

Одновременно в равных температурно-скоростных условиях осуществляется упруго-пластическое закручивание на одинаковые углы φ двух образцов с одинаковой базовой длиной и различными диаметрами $d_1 > d_2$. При испытании измеряется разность крутящих моментов ΔM , по величине которой рассчитывается напряжение сдвига в тонком поверхностном слое $(d_1 - d_2)/2$ образца

большого диаметра. Это напряжение, усредненное по толщине этого слоя, принимается за сопротивление сдвиговой деформации $\tau_s = \frac{12 \cdot \Delta M}{\pi(d_1^3 - d_2^3)}$.



Рис. 4.49. Торсионный пластометр для реализации дифференциального метода Мура

При испытаниях на кручение дифференциальным методом мерой степени деформации сдвига является относительный угол скручивания

$$\gamma = \frac{\pi(d_1 + d_2)}{2l_0} \cdot \frac{\varphi}{360^\circ},$$

где l_0 – базовая длина образцов; φ – угол взаимного разворота головок образцов, град. Нагрев обоих образцов осуществляется одновременно электроконтактным способом после закрепления в захватах. Равномерность нагрева образцов при их параллельном подключении к источнику питания достигается настройкой шунта цепи образца меньшего диаметра. В процессе проведения испытаний измеряется температура нагрева обоих образцов, разность крутящих моментов и углы скручивания. Подключение привода к захватам выполняется посредством электромагнитной муфты.

Пластометр снабжен автоматизированной системой сбора, обработки и хранения информации [148, 149] с оригинальным программным обеспечением, описание которого приведено в прил. 3.

Созданная пластометрическая установка имеет следующие технические характеристики:

- Температура нагрева образцов, °С	до 1500
- Время нагрева, с	10...60
- Диаметр образца меньшего сечения, мм	10,0 ^{±0,03}
- Диаметр образца большего сечения, мм	(10,2...12,0) ^{±0,03}
- Длина рабочей части образца, мм	5...30 мм
- Полная длина образца, мм	70±0,2
- Место установки пластометра	Токарный станок 1А616
- Способ включения фрикционной муфты	Электромагнитный
- Диапазон частот вращения шпинделя, об/мин	8...1800
- Рекомендуемый к практическому использованию диапазон частот вращения шпинделя, об/мин	8...710
- Мощность источника питания, кВт	30
- Максимальный вторичный ток, А	5000
- Диапазон регулирования вторичного напряжения, В	0...20
- Реализуемая скорость деформации при длине рабочей части образцов, с ⁻¹ :	
30 мм	0,008...1,2
20 мм	0,012...1,8
10 мм	0,024...3,6
5 мм	0,048...7,2
- Угол закручивания образца	не ограничен
- Число циклов нагружения	не ограничено
- Минимальная пауза между циклами нагружения, с	0,5

Выполнена конечно-элементная постановка задачи расчета напряженно-деформированного состояния образцов при горячем упруго-пластическом кручении, с помощью которой удастся определить в каждом конкретном случае испытания базовую длину l_0 , на которой распределение напряжений и деформаций сохраняется постоянным, то есть не оказывается влияние жестких холодных головок образцов. Пример расчета степени деформации сдвига в зависимости от текущего радиуса образцов и расстояния k от среднего (по длине) сечения приведены на рис. 4.50.

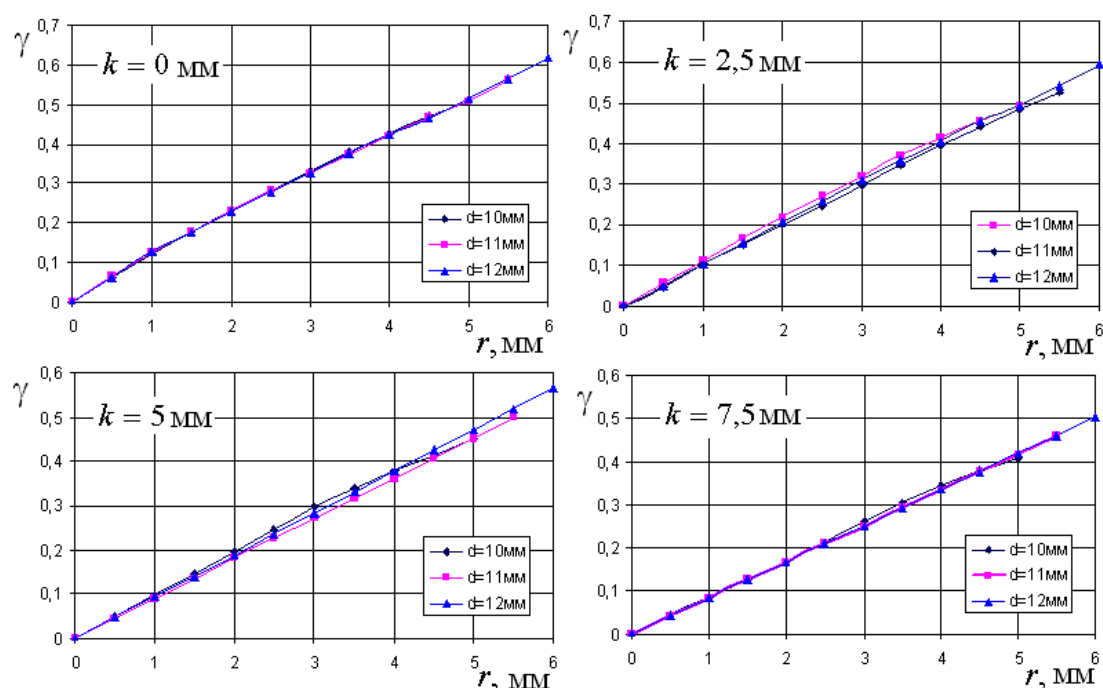


Рис. 4.50. Распределение по сечениям образцов степени деформации сдвига при упруго-пластическом кручении

Созданный торсионный пластометр дает возможность определения сопротивления деформации сдвига со степенями и скоростями деформации, реализуемыми как при прессовании, так и при прокатке с умеренными скоростями. Кроме того, пластометр позволяет изучать процессы динамического разупрочнения при широком варьировании времени пауз при циклическом кручении, степени, скорости деформации и температуры. Большая плотность тока в рабочих частях образцов дает возможность восстанавливать предписанную температуру во время даже сравнительно коротких пауз между циклами нагружения.

Отработан эффективный технический прием варьирования плотности тока в рабочих частях образцов при их последовательном подключении к источнику питания.

4.7. Выводы

1. Созданная с использованием полученных на опытной прокатной установке априорных данных упрощенная математическая модель процесса прокатки круглой в сечении заготовки в квадратном калибре конических валков пригодна для расчета энергосиловых параметров, катающих диаметров и пол-

ных углов скручивания полосы в зоне обжатия. Недостатком этой модели следует считать невозможность с помощью полученных соотношений описать аналогичные характеристики четырехвалковой прокатки по схемам квадрат–круг, квадрат–квадрат и круг–круг, а также определить остаточное скручивание полос, прокатанных в калибрах конических валков.

2. Выполненная конечно-элементная постановка задач прокатки в калибрах конических валков может быть применена для анализа всех рассматриваемых схем прокатки изменением лишь геометрической постановки, непроблемной для современных графических программных средств. Проанализированные в качестве примеров случаи прокатки по схемам круг–квадрат, квадрат–круг и круг–круг (при прокатке сплошных профилей) представлены в конкретном расчете распределениями по объему очага деформации показателя напряженного состояния и степени деформации сдвига, удельными углами скручивания профилей как в зоне обжатия, так и на выходе из валков. Сопоставление с опытными данными показывает практическую пригодность конечно-элементной модели прокатки в калибрах конических валков для технологических расчетов.

3. Методом проведения вычислительного эксперимента по ортогональному плану получена статистическая надежная математическая модель процесса редуционно-растяжной прокатки труб в круглых калибрах (без выпусков и эксцентриситета ручьев) конических валков. С помощью этой модели возможен анализ влияния основных параметров прокатки на изменение толщины стенки, расчет углов скручивания труб и катающих диаметров. Поскольку все численные эксперименты выполняются МКЭ, есть возможность расчета всех показателей напряженно-деформированного состояния, выявление наиболее проблемных с точки зрения исчерпания запаса пластичности зон очага деформации и рационального выбора условий непрерывной прокатки труб с регламентированным межклетевым натяжением.

5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ–ПРОКАТКИ–РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

5.1. Температурная модель процесса передачи горячепрессованного профиля от пресса к прокатному стану

Математическая модель управления температурой профиля при передаче его от горизонтального гидравлического пресса к первой клетке прокатного стана управляет оборудованием предварительного охлаждения на данном промежутке. Структура оборудования предварительного охлаждения представлена на рис. 5.1.

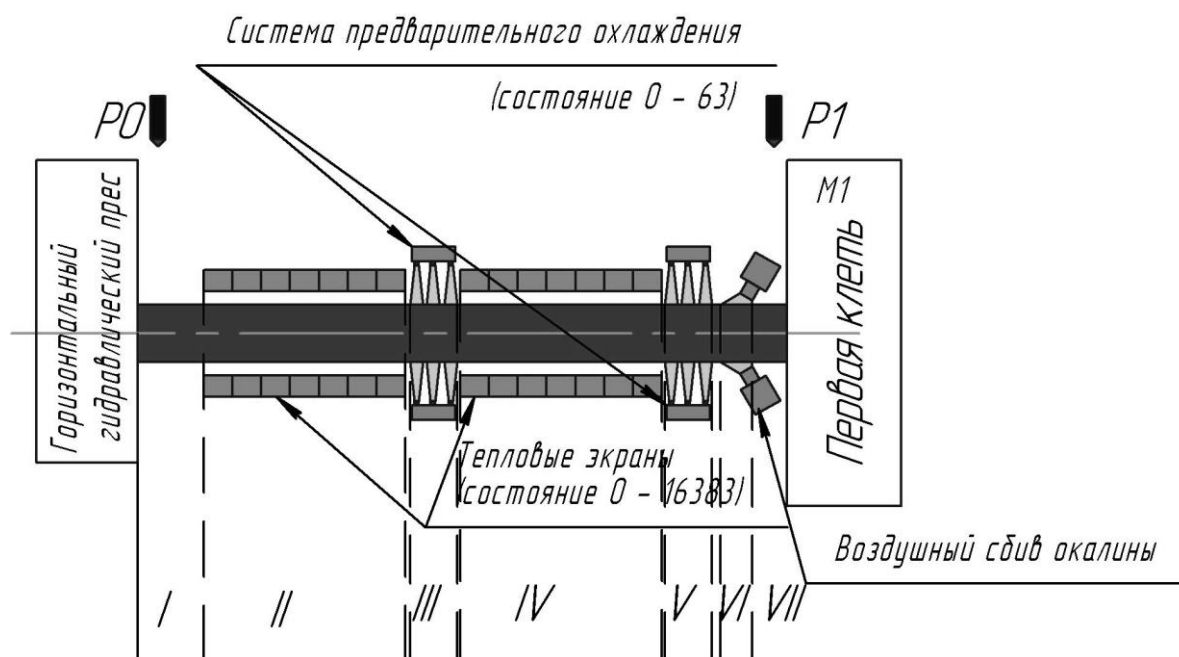


Рис. 5.1. Структура системы управления температурой профиля при передаче от пресса к прокатному стану

Распределение температур в объеме прессуемого слитка оказывает существенное влияние на весь технологический процесс прессования профилей на горизонтальных гидравлических прессах и во многих случаях оказывает существенное влияние на конечный градиент распределения температуры в прессуемом изделии. Исследование температурно-скоростных режимов прессования труб и сплошных профилей на гидравлических прессах было выполнено

Б.М Готлибом [129]. В данной работе, все решения, связанные с распределением температур в процессе прессования, были позаимствованы у авторов [129].

Известно, что при прессовании в зависимости от основных параметров прессования (вытяжка, скорость прессования, изначальное тепловое состояние прессуемого слитка и прессовой оснастки) происходит либо разогрев прессуемого профиля, либо его охлаждение. При настройке редуционно-растяжного стана очень важным параметром является распределение межклетевых натяжений, которое в первую очередь зависит от сопротивления деформации. Сопротивление деформации в межклетевых промежутках определяется исходя из степени деформации, скорости деформации, температуры и протекания процессов рекристаллизации. Так как толщина стенки трубы формируется исходя из поддерживаемых межклетевых натяжений, то главной задачей при управлении прокатным станом является поддержание стабильных межклетевых натяжений.

Авторы работы [129] разработали алгоритм и рекомендации на поддержание постоянных значений температуры прессуемого профиля на выходе из очка матрицы. Критерием управления является заданное изменение скорости прессования. С учетом вышесказанного модель управления прокатным станом не может позволить изменение скорости прессования, поэтому процесс прокатки будет находиться все время в нестационарном режиме, что приведет к разнотолщинности трубы по длине.

Таким образом, основной задачей модели управления температурой профиля при передаче его от горизонтального гидравлического пресса к первой клетки прокатного стана является получение постоянной температуры профиля на входе в прокатный стан при постоянной скорости прессования.

Структура системы предварительного охлаждения

В состав оборудования (рис. 5.1) входят два пирометра: пирометр P0, который производит замер температуры на поверхности профиля на выходе из пресса, и пирометр P1, который производит замер температуры на поверхности профиля перед входом в прокатный стан. Модель управляет (посредством генерирования уставок для исполнительных механизмов) состоянием двух секций

тепловых экранов. Каждая секция тепловых экранов состоит из отдельно управляемых семи экранов, каждый из которых имеет кольцевую форму и в определенный конечный момент времени состояние, равное 1 (экран закрыт) и 0 (экран открыт). Под битовой маской состояния экранов предполагается десятичное представление двоичного числа, которое определяет состояние всех тепловых экранов. Таким образом, получаем два граничных состояния: когда все экраны открыты, то двоичный вектор и соответствующая ему битовая маска равна $(0000000000000000)_2 = 0_{10}$; когда все экраны закрыты, то двоичный вектор и соответствующая ему битовая маска равна $(1111111111111111)_2 = 16383_{10}$.

В состав оборудования также входят два кольцевых коллектора с тремя рядами сопел охлаждения. Битовая маска определяет состояние работы каждого отдельно взятого ряда сопел охлаждения. Два граничных состояния 0 – все сопла выключены и 63 – все сопла имеют заданный расход охлаждающей воды. Кроме состояний сопел охлаждения (включено или выключено) модель определяет необходимый расход охлаждающей воды на каждую группу сопел (коллектор).

Перед входом в прокатный стан расположен коллектор для воздушного сбива окалины и оттеснения воды системы предварительного охлаждения.

Алгоритм работы

Разработан алгоритм для расчета теплового поведения профиля с момента выхода металла из горизонтального гидравлического пресса и до момента входа в первую клетку редукирующего стана. Построение алгоритма основывается на методе конечных разностей. Алгоритм определяет изменение температуры профиля (как функцию времени t) по диаметру профиля (координата r). Принято допущение, что поле распределения температур по диаметру профиля не зависит от тангенциальной координаты (в цилиндрической системе координат).

Основные характеристики модели, реализующей разработанный алгоритм расчета температуры:

- одномерная, конечно-разностная схема постановки задачи;

- выполняется решение уравнения теплопроводности (метод Кранка-Николсона);
- граничные условия (излучение, работа коллекторов охлаждения, работа системы воздушной очистки профиля);
- свойства материала являются функцией температуры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность).

По диаметру профиль разделен на элементы. Размер сетки выбран с переменным шагом: более мелкий шаг ближе к внешней поверхности профиля и больший шаг ближе к центру профиля или к внутренней поверхности трубы. Элементы сетки показаны на рис. 5.2.

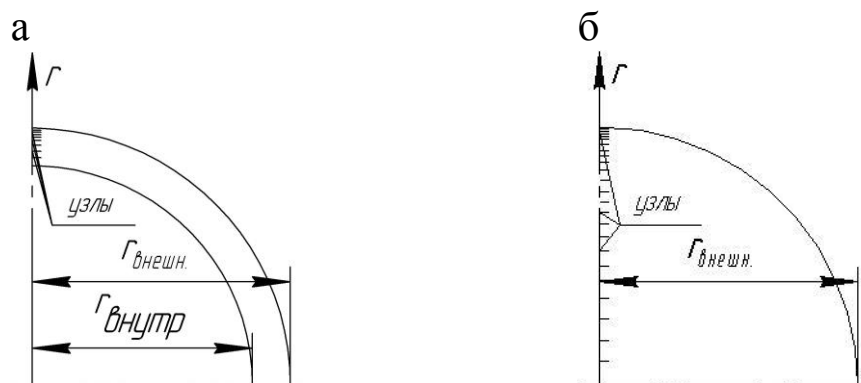


Рис. 5.2. Элементы сетки в одномерном конечно разностном решении уравнения теплопроводности: а – для трубы, б – для сплошного профиля

Уравнение теплопроводности определяет изменение температуры при помощи уравнения Фурье в узлах решетки (в цилиндрической системе координат):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5.1)$$

где T – температура в узлах, [°C]; t – время, [сек]; $\lambda = \lambda(T)$ – функция коэффициента теплопроводности материала от температуры, [Вт/м⁰C]; $\rho = \rho(T)$ – функция плотности материала трубы от температуры, [кг/м³]; $c_p = c_p(T)$ – функция удельной теплоемкости материала трубы от температуры, [Дж/(кг °C сек)]; $r \in [0(r_{\text{внутр}}), r_{\text{внешн}}]$ – координата узла, [м].

Конечно-разностный метод – метод для решения дифференциальных уравнений посредством дробления непрерывного пространства в элементы, вычисляющий значения неизвестных переменных в узлах конечной сетки (рис. 5.2). Известно несколько методов для решения уравнения Фурье, которые дают хорошую аппроксимацию решения. Однако многие из них имеют неудобство использования в связи с малым шагом, для которого должны быть выполнены переходные вычисления, избегающие неустойчивостей численного решения и последовательной нехватки сходимости. Такой подход требует недопустимо большое время вычислений для расчета в реальном масштабе времени, который необходим для построения систем управления станом (АСУТП).

Поэтому был выбран и реализован неявный метод конечных разностей Кранка-Николсона для решения уравнения (5.1). Неявный метод Кранка-Николсона является устойчивым методом, который позволяет выполнить расчет изменения температуры с ограниченным числом тактов, позволяя уменьшать время вычислений, не влияя на точность прогноза изменения температуры.

Согласно методу Кранка-Николсона, температуры в узлах сетки (в случае переменного размера сетки) описываются следующим уравнением:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \frac{1}{2 \cdot \Delta r_m} \cdot \left(\frac{T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{T_{i+1}^{n+1}}{\Delta r_i} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_i} + \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right), \quad (5.2)$$

где $\Delta r_m = \frac{\Delta r_{i-1} + \Delta r_i}{2}$ – средний размер смежного элемента.

Индекс i отображает номер узла, индекс n отображает номер шага времени. Запишем уравнение (5.2) следующим образом: неизвестные температуры $(n + 1)$ -ого шага времени перенесем в левую сторону, а компоненты с известной температурой n -ого шага времени – в правую:

$$-\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} \cdot T_{i-1}^{n+1} + \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \right) \cdot T_i^{n+1} - \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \cdot T_{i+1}^{n+1} = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right), \quad (5.3)$$

где $\chi_f = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta r_m}$.

Таким образом, для вычисления температуры в узлах сетки необходимо решить систему линейных уравнений (5.3), где неизвестные – это температуры в узлах на $(n+1)$ -ом шаге времени. Неизвестные коэффициенты обозначим следующим образом:

$$- \text{коэффициент слева от главной диагонали: } B = -\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}}; \quad (5.4)$$

$$- \text{коэффициент на главной диагонали: } D = \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i}\right); \quad (5.5)$$

$$- \text{коэффициент справа от главной диагонали: } A = -\frac{\chi_f}{\Delta r_i}; \quad (5.6)$$

$$- \text{элементы постоянного вектора: } C = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) \quad (5.7)$$

Температура в узлах на $(n+1)$ -ом шаге времени может быть рассчитана путем решения тридиагональной системы уравнений:

$$\begin{vmatrix} D_{iL} & A_{iL} & 0 & 0 & 0 \\ B_i & D_i & A_i & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & B_{iU} & D_{iU} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_{iL}^{n+1} \\ T_i^{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ T_{iU}^{n+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{iL} \\ C_i \\ \dots \\ \dots \\ C_{iU} \end{vmatrix}$$

Система уравнения представлена в матричной форме. Слева – произведение между коэффициентами матрицы уравнений и вектора неизвестных температур в узлах, справа – вектор постоянных уравнений. Другие элементы матрицы коэффициентов уравнения равны 0.

Вычислив коэффициенты B , D и A и константы C по уравнениям (5.4), (5.5), (5.6) и (5.7) система уравнений будет определена.

В матричном представлении системы уравнений первая линия L соответствует узлу, находящемуся на внешней поверхности трубы, где температуру необходимо рассчитать как функцию граничных условий, и последняя линия U соответствует узлу на внутренней поверхности трубы.

Расчет температуры узлов на внешней поверхности трубы

Температура узла на поверхности профиля рассчитана как функция граничных условий. Такая температура должна удовлетворить условию равновесия между тепловыми потоками, проходящими через поверхность. Из закона Фурье граничный тепловой поток:

$$q_w = -\lambda_t \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{внешн.}}}, \quad (5.8)$$

где q_w – тепловой поток на внешней поверхности трубы, [Дж/(м²сек)];

λ_t – теплопроводность материала трубы, [Дж/(м°Ксек)].

При конечно-разностной аппроксимации предполагается, что распределение температуры около границы – полиномиальное. Для равноотстоящих точек сетки, увеличивающих ряд Тейлора, уравнение (5.8) может быть преобразовано:

$$q_w = -\lambda_t \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{внешн.}}} = \frac{\lambda_t}{6 \cdot \Delta r} \cdot (11 \cdot T_1 - 18 \cdot T_2 + 9 \cdot T_3 - 2 \cdot T_4),$$

где T_1 – температура узла на поверхности; T_2, T_3 и T_4 – температуры второго, третьего и четвертого узлов.

Для вычисления температуры поверхности T_1 необходимо рассчитать внешний тепловой поток с учетом определенных граничных условий. Значение количества тепла в единицу времени, проходящего через поверхность трубы, вычисляется исходя из следующих механизмов теплообмена: излучение и воздушная конвекция, теплообмен с водой системы охлаждения.

Потери тепловым излучением и воздушной конвекцией

Полное тепловое излучение удовлетворяет условиям закона Стефана-Больцмана

$$Q_p = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^4 - T_{\text{amb}}^4) \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

где σ_s – коэффициент Стефана-Больцмана; ε_m – коэффициент излучения на поверхности профиля; T_s и T_{amb} – температура поверхности профиля и температура окружающей среды соответственно, [°К].

Коэффициент теплообмена зависит от псевдотемпературы и рассчитывается:

$$h_{rad} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{T_s^4 - T_{amb}^4}{T_s - T_{amb}} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_s + T_{amb}).$$

В расчетах рассматривается температурная зависимость теплоизлучения профиля. Режим тепловой конвекции может быть естественной конвекцией, или вынужденной конвекцией, зависящей от скорости перемещения профиля.

Коэффициент теплообмена конвекцией h_{conv} – комплексная функция безразмерных чисел Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr):

$$h_{conv} = f(Re, Nu, Pr).$$

В случае горячей прокатки на низкой скорости, так как теплота, удаленная тепловой конвекцией, является малой по сравнению с общей потерей тепла, коэффициент теплопередачи для естественной воздушной конвекции принят постоянным с закрепленным значением, приблизительно 8,5...10,0 Вт/(м²·°К).

Когда скорость прокатки увеличивается, коэффициент теплообмена для вынужденной конвекции становится больше, чем это значение, и его нельзя считать постоянным.

Коэффициент теплообмена конвекцией рассчитывается:

$$h_{conv} = \frac{2 \cdot \lambda_{air} \cdot Nu}{\pi \cdot r_{внешн}}.$$

Число Нуссельта есть функция числа Прандтля и Рейнольдса:

$$\text{для } Re < 5105: Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,333};$$

$$\text{для } Re > 5105: Nu = 0,037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,333},$$

$$\text{где } Pr = \frac{v_{air} \cdot c_{air}}{\lambda_{air}} - \text{число Прандтля; } Re = \frac{\rho_{air} \cdot V \cdot \pi \cdot r_{внешн}}{2 \cdot v_{air}} - \text{число Рейнольдса.}$$

В вышеописанных формулах использованы следующие обозначения:

$\lambda_{air} = \lambda_{air}(T)$ – теплопроводность воздуха как функция температуры, [Дж/(м·°К·сек)]; $v_{air} = v_{air}(T)$ – вязкость воздуха как функция температуры,

[кг/(м·сек)]; $c_{air} = c_{air}(T)$ – удельная теплоемкость воздуха как функция температуры, [Дж/(кг·°K)].

В случае открытых тепловых экранов среднюю температуру воздуха рассматриваем как среднеарифметическую температуру поверхности профиля и окружающего воздуха: $\bar{T}_{air0} = (T_{air} + T_{Me})/2$.

Результаты вклада излучения и конвекции в теплообмен будут рассчитаны

$$Q_{total} = Q_r + Q_{conv} = \sigma_s \cdot \epsilon_m \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) + h_{conv} \cdot (T_s - T_{amb}) = (h_{rad} + h_{conv}) \cdot (T_s - T_{amb}).$$

Алгоритм работы

Как было сказано, основной задачей модели является получение постоянной температуры профиля на входе в первую клеть прокатного стана (пирометр Р1 на рис. 5.1) при постоянной скорости прессования и при изменяющейся температуре профиля на выходе из пресса (пирометр Р0 на рис. 5.1). На рис. 5.3 качественно представлен график изменения температуры прессуемого профиля во времени.

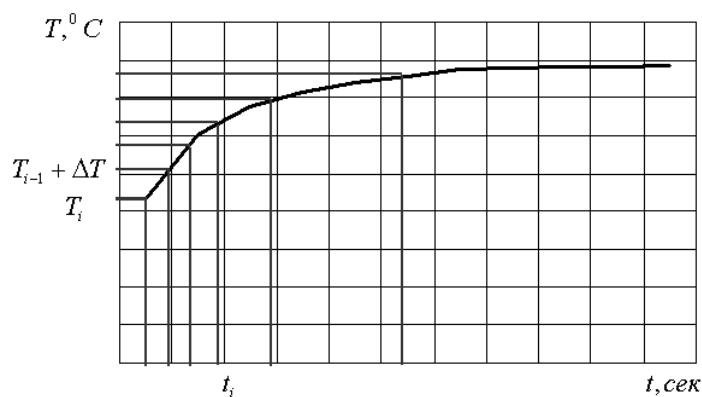


Рис. 5.3. Изменение температуры прессуемого профиля

Модель рассчитывает температуру для некоторого участка профиля. В рамках каждого участка прессуемого профиля предполагается, что состояние битовых масок оборудования системы предварительного охлаждения является однородным. Длина участка профиля не является строго фиксированной величиной. Величина длины каждого участка является функцией теплового состояния профиля на выходе из горизонтального гидравлического пресса.

Пусть за некоторое время $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ температура прессуемого изделия изменяется на величину $\Delta T = T_i - T_{i-1}$. Предполагается, что в момент времени, когда $T_i \in [T_i + \Delta T]$, рост или падение температуры на выходе из очка матрицы (пирометр P0) находится в диапазоне допустимых температур на входе в первую клетку прокатного стана. В этот диапазон времени оборудование системы предварительного охлаждения находится в постоянном состоянии, при котором достигается температура на входе в первую клетку прокатного стана. В течение некоторого времени, заранее неизвестного, температура повышается/понижается на некоторую величину ΔT . При выходе температуры прессизделия за допустимые пределы температурная модель регистрирует событие, по которому она рассчитывает новую настройку оборудования системы предварительного охлаждения.

На рис. 5.4 показана упрощенная структурная схема работы алгоритма модели температуры профиля при передаче от гидравлического прессы к прокатному стану.

После наступления события выхода температуры за диапазон производится идентификация этого выпадения (происходит разогрев или охлаждение прессуемого профиля). Если происходит разогрев или охлаждение прессуемого профиля, то система должна соответственно уменьшить или увеличить количество закрытых тепловых экранов. Перед процедурой изменения состояния тепловых экранов проверяется условие их состояния. В случае удовлетворения условия возможности изменить количество закрытых экранов производится расчет температуры начала прокатки и проверяется условие сходимости с заданной температурой начала прокатки. В случае невозможности изменить состояние тепловых экранов система производит изменение состояния коллекторов охлаждения. Процедура выполняется до сходимости (в рамках предельно допустимых температур) расчетного значения температуры и заданной температуры начала прокатки.

В случае невозможности получить заданную температуру начала прокатки (выпадение за пределы граничных состояний оборудования системы предва-

рительного охлаждения) система генерирует событие максимально или минимально недопустимой скорости прессования. В этом случае модель управления гидравлическим прессом должна изменить скорость прессования.

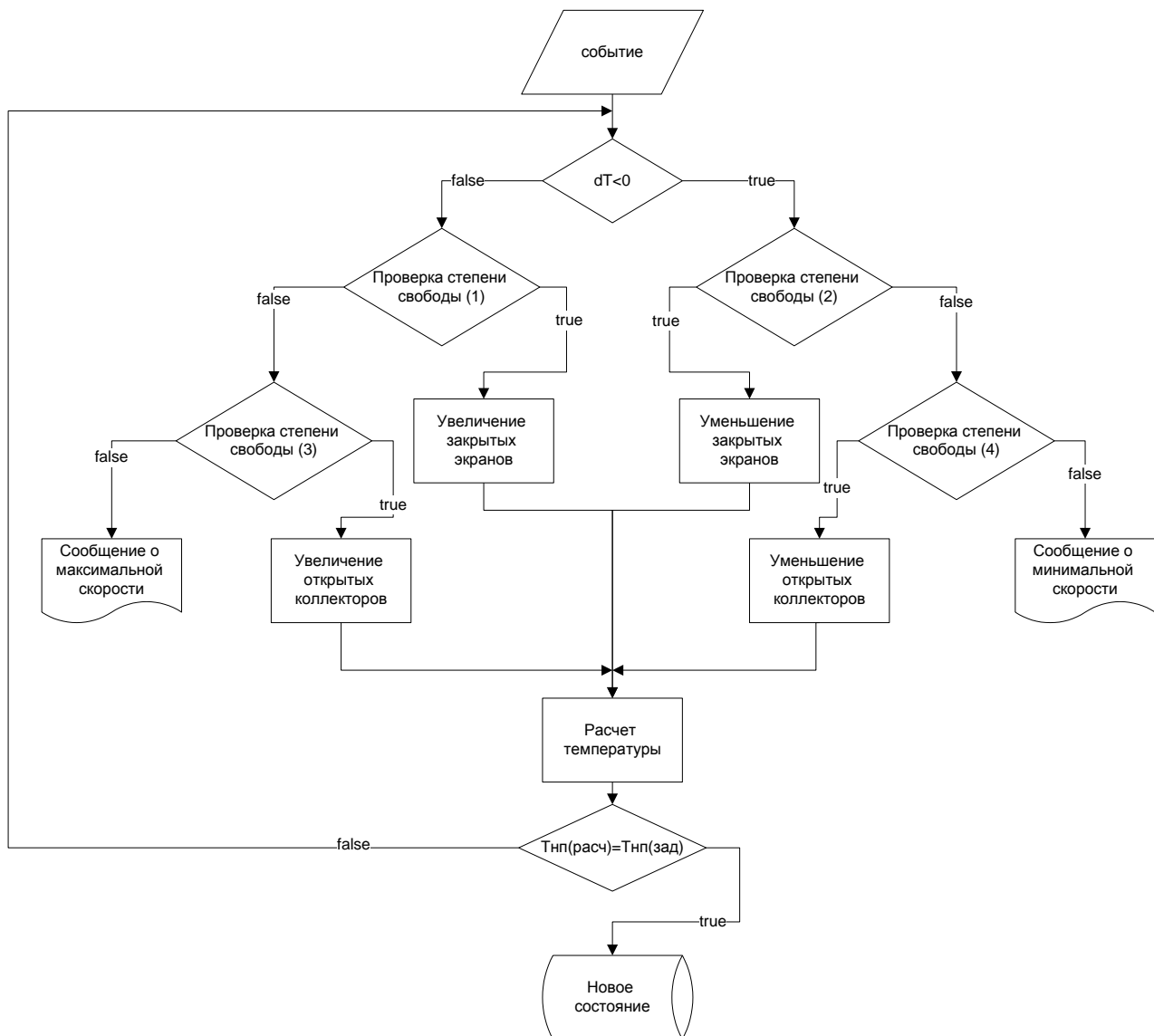


Рис. 5.4. Алгоритм работы

5.2. Температурная модель непрерывного прокатного стана

Разработан алгоритм для расчета теплового поведения профиля с момента входа металла в первую клеть прокатного стана и до момента выхода из последней клетки стана. Построение алгоритма основывается на методе конечных разностей. Он определяет изменение температуры профиля (как функцию времени t) по диаметру профиля (координата r). Принято допущение, что поле

распределения температур по диаметру профиля не зависит от тангенциальной координаты (в цилиндрической системе координат).

Основные характеристики модели, реализующей разработанный алгоритм расчета температуры:

- одномерная конечно-разностная схема постановки задачи;
- выполняется решение уравнения теплопроводности (метод Кранка-Николсона);
- граничные условия (излучение, контакт с валками, охлаждение в результате работы систем охлаждения валков, межклетевое охлаждение);
- свойства материала являются функцией температуры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность);
- учет тепла деформации.

Уравнение теплопроводности описывает изменение температуры при помощи уравнения Фурье в узлах решетки:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q_{\text{деф.}}}{\rho \cdot c_p} \quad (5.9)$$

где T – температура в узлах, [°C]; t – время, [сек]; $\lambda = \lambda(T)$ – функция коэффициента теплопроводности материала от температуры, [Дж/(м·°K·сек)];

$\rho = \rho(T)$ – функция плотности материала трубы от температуры, [кг/м³];

$c_p = c_p(T)$ – функция удельной теплоемкости материала трубы от температуры,

[Дж/(кг °K сек)]; $r \in [r_{\text{внутр}}, r_{\text{внешн}}]$ – координата узла, [м]; $Q_{\text{деф.}}$ – тепло деформации, [Дж/(м³ сек)].

Реализован неявный метод конечных разностей Кранка-Николсона для решения уравнения (5.9). Неявный метод Кранка-Николсона является устойчивым методом, который позволяет выполнить расчет изменения температуры с ограниченным числом тактов, позволяя сохранять время вычислений, не влияя на точность прогноза изменения температуры.

Согласно методу Кранка-Николсона, температуры в узлах сетки (в случае переменного размера сетки) описываются следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} &= \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \frac{1}{2 \cdot \Delta r_m} \times \\ &\times \left(\frac{T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{T_{i+1}^{n+1}}{\Delta r_i} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_i} + \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) + \frac{Q_{\text{деф.}}}{\rho \cdot c_p}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

где $\Delta r_m = \frac{\Delta r_{i-1} + \Delta r_i}{2}$ – средний размер смежного элемента.

Индекс i отображает номер узла, индекс n отображает номер шага времени.

Запишем уравнение (5.10) следующим образом: неизвестные температуры $(n+1)$ -го шага времени в левой стороне и компоненты с известной температурой n -ого шага времени в правой стороне:

$$\begin{aligned} -\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} \cdot T_{i-1}^{n+1} + \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \right) \cdot T_i^{n+1} - \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \cdot T_{i+1}^{n+1} = \\ = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) + \frac{Q_{\text{деф.}}}{\rho \cdot c_p}, \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\text{где } \chi_f = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \cdot \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta r_m}.$$

Таким образом, для вычисления температуры в узлах сетки, необходимо решить систему линейных уравнений (5.11), где неизвестные – это температуры в узлах на $(n+1)$ -ом шаге времени. Неизвестные коэффициенты обозначим следующим образом:

$$\text{– коэффициент слева от главной диагонали } B = -\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}}; \quad (5.12)$$

$$\text{– коэффициент на главной диагонали } D = \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \right); \quad (5.13)$$

$$\text{– коэффициент справа от главной диагонали } A = -\frac{\chi_f}{\Delta r_i}; \quad (5.14)$$

– элементы постоянного вектора

$$C = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) + \frac{Q_{\text{деф.}}}{\rho \cdot c_p}. \quad (5.15)$$

Температура в узлах на $(n+1)$ -ом шаге времени может быть рассчитана путем решения тридиагональной системы уравнений, представленной в матричной форме как в предыдущей задаче:

$$\begin{vmatrix} D_{iL} & A_{iL} & 0 & 0 & 0 \\ B_i & D_i & A_i & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & B_{iU} & D_{iU} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_{iL}^{n+1} \\ T_i^{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ T_{iU}^{n+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{iL} \\ C_i \\ \dots \\ \dots \\ C_{iU} \end{vmatrix}$$

Система уравнения представлена в матричной форме. Слева – произведение между коэффициентами матрицы уравнений и вектора неизвестных температур в узлах, справа – вектор постоянных уравнений. Другие элементы матрицы коэффициентов уравнения равны 0.

Вычислив коэффициенты B , D и A и константы C по уравнениям (5.12), (5.13), (5.14) и (5.15), система уравнений будет определена.

В матричном представлении системы уравнений первая линия L соответствует узлу, находящемуся на внешней поверхности трубы, где температуру необходимо рассчитать как функцию граничных условий, и последняя линия U соответствует узлу на внутренней поверхности трубы.

Расчет температуры узлов на внешней поверхности профиля осуществляется так же, как и при движении профиля от прессы к прокатному стану с учетом следующих механизмов теплообмена:

- излучение и воздушная конвекция;
- теплообмен с водой системы охлаждения рабочих валков, или охлаждения профиля в межклетевом промежутке;
- контакт между трубой и рабочим валком в калибре.

Тепловые явления в калибре

При прохождении профиля через калибр в результате пластической деформации происходит внутреннее тепловыделение. В то же время на контакте

между трубой и валками совершается работа трения из-за их относительного движения и возникают тепловые потоки переноса между этими двумя элементами. Поэтому изменение температуры профиля в течение времени прохождения через калибр – результат вклада следующих трех главных компонентов:

- тепло деформации;
- энергия трения в зоне контакта;
- теплопередача от профиля к валкам из-за разности температур.

Энергия деформации – функция локальной эквивалентной деформации и сопротивления металла пластической деформации.

Используем упрощенную зависимость для вычисления выделяемой теплоты $Q_{\text{деф}}$ в объеме очага деформации $V_{\text{оч}}$: $Q_{\text{деф}} = \eta_{\text{деф}} \cdot \sigma_s(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \cdot V_{\text{оч}} \cdot \ln(\lambda)$, где λ – вытяжка в клети; $\eta_{\text{деф}}$ – эффективное тепло за счет пластической деформации.

Теплота трения, сгенерированная на поверхности контакта из-за работы сил трения системы профиль–валок во время относительного перемещения,

рассчитывается по формуле: $Q_{\text{тр}} = \frac{\mu \cdot p_{\text{ср}}}{4} \cdot (1 + \lambda) \cdot v_{\text{вал}} \cdot s_{\text{оп}}$,

где $p_{\text{ср}}$ – среднее давление металла на валки в калибре, [МПа]; $v_{\text{вал}}$ – окружная скорость вала (на катающем диаметре), [м/с]; μ – коэффициент трения по Кулону-Амонтону; $s_{\text{оп}}$ – опережение.

Тепловой поток на границе между трубой и валком – функция локальной разницы температуры между двумя поверхностями контакта. Граничное уравнение равновесия

$$-\lambda_s(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = h_c(T - T_c) = Q_c,$$

где $\lambda_s(T)$ – теплопроводность металла как функция температуры; h_c – коэффициент теплообмена для контакта профиль-валок; T_c – температура поверхности вала в контакте с профилем; T – температура поверхности профиля в контакте с валком.

Так как теплопроводность на поверхности контакта профиля и вала во время горячей прокатки зависит от контактного давления и является достаточно малой, чтобы считаться значительной, то можно использовать упрощенную формулу для вычисления. Так как тепловые потоки в тонком слое около контактной поверхности могут быть суммированы каждый как тепловой поток в полубесконечное твердое тело, то общий тепловой поток Q_c может быть рассчитан

$$Q_c = F_k \cdot \chi_f \cdot \frac{2\lambda_s(T)}{\sqrt{\pi \cdot a_s}} \frac{(T_{s0} - T_m)}{\sqrt{t_c}},$$

где средняя температура поверхности вала T_m вдоль поверхности контакта получена как $T_m = \frac{\lambda_s(a_s)^{-1/2} \cdot T_{s0} + \lambda_c(a_c)^{-1/2} \cdot T_{c0}}{\lambda_s(a_s)^{-1/2} + \lambda_c(a_c)^{-1/2}}$; λ_s , λ_c – теплопроводность поверхности профиля и вала; a_s , a_c – тепловая диффузия поверхностного слоя профиля и вала; T_{s0} , T_{c0} – температура поверхности профиля и вала перед входом участка профиля в калибр; F_k – площадь контакта; χ_f – коэффициент сглаживания (параметр настройки модели температуры АСУ ТП); t_c – время контакта.

Потери тепловым излучением и воздушной конвекцией

В проходе профиля между клетями излучение в атмосферу – преобладающий механизм тепловых потерь.

Полное тепловое излучение удовлетворяет условиям закона Стефана-Больцмана: $Q_p = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4)$, [Вт/м²], где σ_s – коэффициент Стефана-Больцмана; ε_m – коэффициент излучения на поверхности профиля; T_s и T_{amb} – температура поверхности профиля и температура окружающей среды, [°K].

Коэффициент теплообмена зависит от псевдотемпературы и рассчитывается по формуле

$$h_{rad} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{T_s^4 - T_{amb}^4}{T_s - T_{amb}} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_s + T_{amb}).$$

В расчетах рассматривается температурная зависимость теплоизлучения трубы. Режим тепловой конвекции может быть естественной конвекцией, или вынужденной конвекцией, зависящей от скорости перемещения профиля.

Коэффициент теплообмена конвекцией h_{conv} – комплексная функция безразмерных чисел Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr):

$$h_{conv} = f(\text{Re}, \text{Nu}, \text{Pr}).$$

В случае горячей прокатки на низкой скорости, так как теплота, удаленная тепловой конвекцией, является малой по сравнению с общей потерей тепла, коэффициент теплопередачи для естественной воздушной конвекции принят постоянным, с закрепленным значением приблизительно $8,5 \dots 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К})$.

Среднюю температуру воздуха рассматриваем как среднеарифметическую температуру поверхности трубы и окружающего воздуха $\bar{T}_{air} = (T_{air} + T_{Me}) / 2$.

Результаты вклада излучения и конвекции в теплообмен будут рассчитаны

$$Q_{total} = Q_r + Q_{conv} = \sigma_s \cdot \epsilon_m \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) + h_{conv} \cdot (T_s - T_{amb}) = (h_{rad} + h_{conv}) \cdot (T_s - T_{amb}).$$

Тепловые явления в межклетевых промежутках

Во время прохождения профиля через каждый межклетевой промежуток по линии редуционно-растяжного стана несколько механизмов теплообмена влияют на изменение температуры в зависимости от граничных условий (рис. 5.5):

- излучение + конвекция (зона II и IV);
- теплообмен из-за контакта валков с охлаждающей водой на выходе и входе в калибр (зона I и V);
- конвективный теплообмен под охлаждающей струей в межклетевом промежутке (зона III).

На линии редуционно-растяжного стана предполагается система межклетевого охлаждения, которая состоит из кольцевых коллекторов охлаждения,

установленных во всех межклетевых промежутках. На каждом кольцевом коллекторе расположено три независимых ряда сопел.

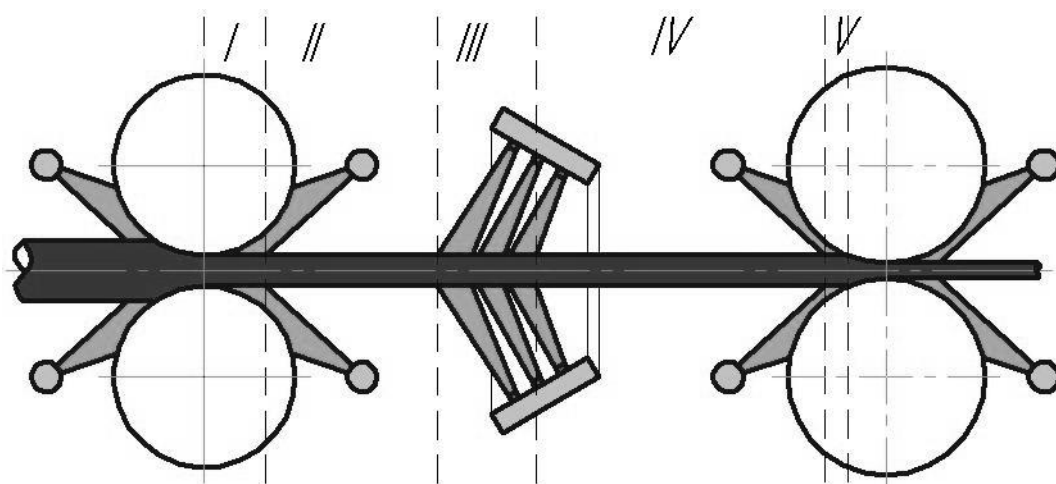


Рис. 5.5. Дробление межклетевой зоны на подзоны

В тепловой модели полосы межклетевые зоны подразделены на подзоны в зависимости от соответствующих граничных условий. Уравнение теплопроводности (5.9) решается на основании граничных условий, необходимых для определения температуры поверхности трубы (температуры внешнего узла).

5.3. Температурная модель линии охлаждения катаных профилей

Коррозионно-стойкие марки стали 12X18H9, 12X18H9T и 12X18H10T относятся к хромоникелевым маркам аустенитного класса. В хромоникелевых аустенитных сталях возможны следующие превращения [152]: образование карбидных, карбонитридных фаз и σ -фазы при нагревах в интервале $650...850^{\circ}\text{C}$; растворение этих фаз при нагреве до более высоких температур ($1100...1200^{\circ}\text{C}$); образование δ -феррита при высоких температурах нагрева; образование α - и ε -мартенситных фаз при охлаждении и пластической деформации.

Выделение карбонитридных фаз происходит преимущественно по границам зерен, что снижает пластичность сталей и их сопротивление МКК. Таким образом, целью термической обработки является получение аустенитной струк-

туры, снятие внутренних напряжений и устранение склонности к МКК, которая возникает при горячей обработке давлением [152].

Термическая обработка нестабилизированных титаном или ниобием хромоникелевых аустенитных сталей (например, 12Х18Н9) заключается в закалке из однофазной аустенитной области (1000°C) в воду. Стали, стабилизированные титаном или ниобием, закаляются из двухфазной области аустенита и специальных карбидов, температура составляет обычно $1000...1100^{\circ}\text{C}$ [152].

Недостатком закалки стали являются большие энергозатраты на осуществление нагрева до указанных температур. Целесообразно использовать тепло нагрева под деформацию. Для получения равномерной температуры по длине профиля необходимо создание моделей управления, способных регулировать скорость охлаждения по длине профиля.

За станом прокатки сплошных и полых профилей устанавливается линия охлаждения. Линия охлаждения может состоять из нескольких блоков охлаждения. В зависимости от требуемой скорости охлаждения профиля, для получения заданной структуры каждый блок может изменять расход воды для охлаждения профиля. В зависимости от конструкции блока охлаждения расход воды может варьироваться от 0 (блок выключен) до $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении воды в форсунках до 2 МПа.

Задачей температурной модели охлаждения профилей является подбор совокупности включенных блоков охлаждения и установка в этих блоках расхода охлаждающей воды с целью обеспечения заданной скорости охлаждения.

Скорость охлаждения и длительность структурного преобразования рационально определять на основании термокинетических диаграмм. На рис. 5.6 показана схема термокинетической диаграммы с условными кривыми охлаждения для разных слоев поперечного сечения охлаждаемого профиля из стали 12Х18Н9 (а) и 12Х18Н9Т (б) [152].

Основные характеристики модели, реализующей разработанный алгоритм расчета температуры:

- одномерная конечно-разностная схема постановки задачи;

- выполняется решение уравнения теплопроводности (метод Кранка-Николсона);

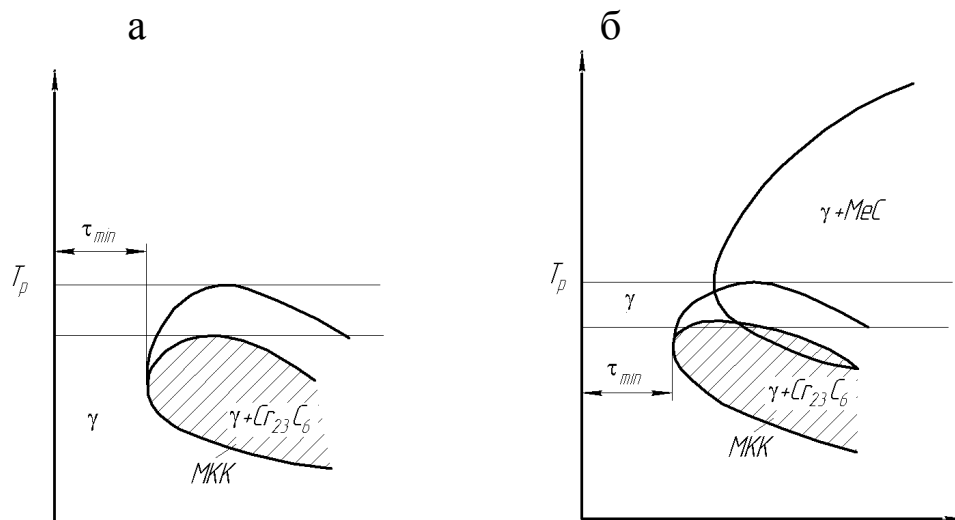


Рис. 5.6. Схема термокинетической диаграммы

- граничные условия (излучение, конвективный теплообмен);
- свойства материала являются функцией температуры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность).

Метод решения уравнения теплопроводности довольно подробно описан в пункте 5.1 и 5.2. При охлаждении в бочке, где существует относительное разнонаправленное перемещение профиля и охлаждающей воды, возникают некоторые трудности при определении коэффициента теплопроводности, который фактически является фиктивной величиной. В работах [150, 151] показано, что нестационарные задачи теплопереноса следует в общем случае решать как сопряженные, т.е. одновременно необходимо решать уравнения переноса и для тела, и для среды, омывающей тело. Однако в ряде случаев применение граничных условий третьего рода вполне оправдано [73].

В работе [73] выполнен расчет зависимости коэффициента теплопередачи от температуры. Данная зависимость представлена на рис. 5.7.

Задача модели настройки охлаждения заключается в расчете группы данных, которые будут использованы на уровне 1 как уставки для выполнения следующих операций:

- активация исходного шаблона блоков охлаждения и их расходов;

– осуществление прямой коррекции, основанной на замерах колебаний температуры конца прокатки (температуры профиля на выходе из последней клетки стана);

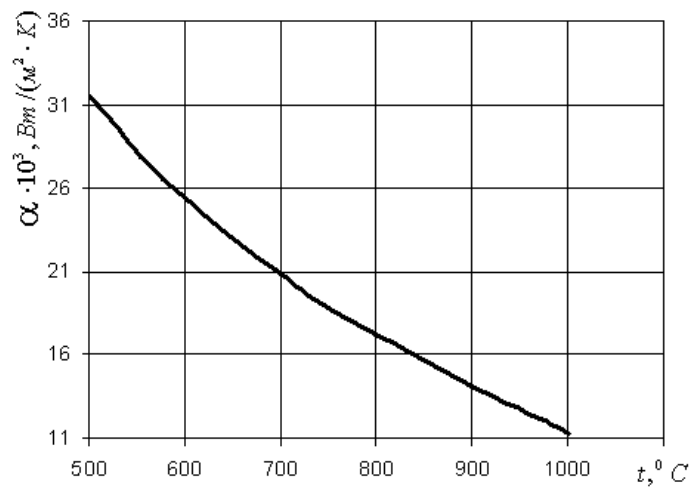


Рис. 5.7. Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры

– осуществление предсказуемой коррекции, основанной на замерах или расчетах колебаний скорости профиля;

– осуществление коррекции по сигналам обратной связи, основанной на погрешностях температуры конца охлаждения.

Модель настройки охлаждения рассчитывает шаблоны блоков охлаждения, учитывая заданный температурный профиль (определяется на основании термокинетических диаграмм), т.е. заранее определенную траекторию «время-температура». Начиная с этой траектории, настройка охлаждения выберет шаблон блоков охлаждения, необходимых для достижения заданных изменений температуры профиля.

Конфигурация шаблона блоков охлаждения рассчитывается и направляется на уровень 1 для различных зон профиля; каждую зону можно рассматривать как участок профиля с одинаковыми характеристиками в отношении шаблона охлаждения, который применяется для обеспечения заданной температуры конца охлаждения профиля.

Модель настройки охлаждения рассчитывает зоны охлаждения и соответствующие шаблоны, следуя приведенному ниже алгоритму:

1) используя исходную (пусковую) скорость профиля, модель рассчитывает первый шаблон зоны; в таком шаблоне активным будет первый блок в положении, соответствующем охлаждению водой при температуре, взятой согласно температурному профилю (температура начала охлаждения);

2) исходя из скорости движения профиля модель рассчитывает отклонение от текущей температуры (на первом блоке шаблона) от стартовой температуры охлаждения; когда отклонение от вышеназванной температуры достигает предварительно определенного предела (данный предел выбирается на основании аппаратных возможностей системы управления станом с точки зрения производительности вычислительных машин), определяется следующая зона и происходит расчет нового шаблона для этой зоны; новый шаблон блока охлаждения также будет иметь новые приоритеты переключения, происходит возврат к шагу (2) до тех пор, пока профиль не будет весь покрыт зонами.

Расчет требуемой кривой охлаждения

Модель вычисляет требуемую кривую охлаждения. Кривая охлаждения – это зависимость вида: температура – время, которому должна следовать каждая зона профиля. Целевая кривая охлаждения определена, начиная со стандартного «температурного профиля», который является множеством пар времени/температуры

$$\begin{pmatrix} T_0 & T_1 & \dots T_N \\ t_0 & t_1 & \dots t_N \end{pmatrix}.$$

Чтобы получить кривую охлаждения от температурного профиля, модель понижает первую температурную точку T_0 до заданной температуры конца прокатки профиля ($T_{\text{кп}}$). Схема основной кривой охлаждения представлена на рис. 5.8.

Выбор блока охлаждения

Были определены одна или более зон охлаждения. Для каждой зоны охлаждения, идентифицированной посредством начальной и конечной длины прокатанного профиля, установлена скорость и соответственно модель назна-

чит для каждой зоны охлаждения полосы – для каждого блока охлаждения заданное падение температуры ΔT^{target} , которое представляет разность между

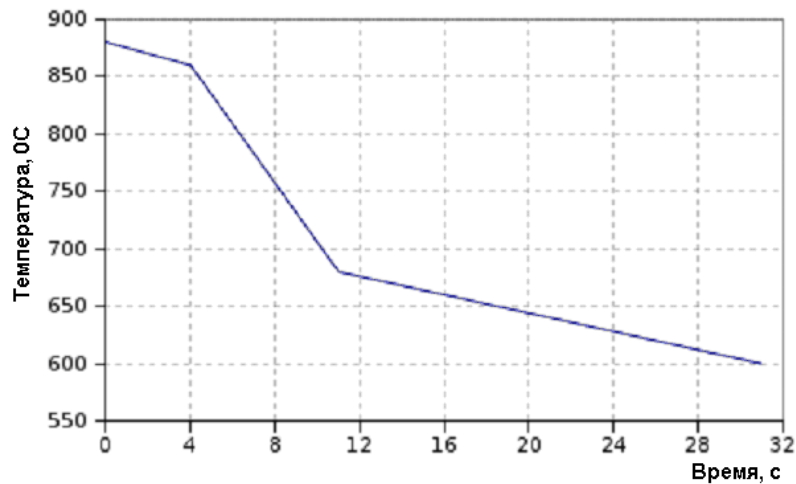


Рис.5.8. Схема кривой охлаждения

фактической расчетной температурой и целевой температурой кривой охлаждения в фиксированное время и положение точки профиля по длине линии охлаждения. Тогда, начиная с конечной температуры конца охлаждения, алгоритм вычисляет для каждого положения точки профиля вдоль линии охлаждения целевой эквивалентный коэффициент теплообмена

$$H_{eq}^{target} = \frac{\Delta T^{target} \cdot c(T) \cdot \rho(T) \cdot \Delta r}{\Delta t \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{вод}})},$$

где $c(T)$ – удельная теплоемкость стали как функция температуры; $\rho(T)$ – плотность стали как функция температуры; Δr – толщина стенки трубы (или радиус сплошного профиля); $T_{\text{п}}, T_{\text{вод}}$ – температура профиля и температура воды соответственно.

На основании полученного вектора значений эквивалентного теплообмена возможно получить требуемый расход в каждом блоке, который необходимо включить для поддержания целевого профиля охлаждения.

Таким образом, идентифицирована первая уставка блоков охлаждения для каждой зоны. Количество зон и соответственно количество уставок системы охлаждения во многом зависит от стабильности протекания процесса прокатки. В случае стабильного предсказания температуры и достоверно контро-

лируемого расхода жидкости в блоках охлаждения при неизменной скорости прессования и соответственно скорости выхода профиля из последней клетки прокатного стана модель идентифицирует только одну зону и уставки для нее.

5.4. Деформационно-скоростная модель непрерывного стана

Деформационно-скоростная модель непрерывного прокатного стана функционально состоит из трех основных частей:

- модель распределения обжатий профиля по клетям стана;
- модель расчета уставок для первоначальной настройки стана;
- расчет чувствительностей для обновления настройки.

Модель распределения обжатий профиля

Модель распределения обжатий не относится к общей системе управления процессом прокатки на редуционно-растяжном стане. Основной задачей данной модели является идентификация стратегии калибровки валков стана. Данная модель относится к классу оптимизационных моделей и в зависимости от целевой функции при оптимизации может использовать функции модели расчета уставок для настройки и управления процессом. При создании новых станов и систем управлений появляется возможность гибкой перенастройки стана на различные типоразмеры прокатываемых профилей. Так, практика применения станов редуционной прокатки показывает, что легко осуществима возможность изменения положения валков в клетки соответственно с изменением размеров калибра, возможность вывода последних клеток непрерывного стана для получения меньшего суммарного обжатия по диаметру. В связи с этим на задачу оптимизации накладывается ряд ограничений, при которых нецелесообразно строить функцию оптимизации и решать ее. Таким образом, при выборе стратегии обжатий в данной работе модель оптимизации строиться не будет.

Модель распределения обжатий профиля по клетям стана имеет несколько функций:

- равномерное распределение обжатий по клетям;
- распределение обжатий согласно заданному относительному вектору обжатий в каждой клетке стана, при котором обжатие задается относительным коэффициентом по отношению к первой клетке стана;
- равномерное распределение вытяжек по клетям стана;
- распределение вытяжек согласно заданному относительному вектору вытяжек в каждой клетке стана;
- распределения по энергосиловым характеристикам.

Только первые две функции модели распределения обжатий не требуют участия модели расчета уставок. Остальные функции имеют контур связи с моделью расчета уставок, так как сигнатура их функции оптимизации включает в себя параметры, которые идентифицирует модель расчета уставок. Функция распределения по энергосиловым характеристикам предполагает оптимизацию распределения обжатий исходя из минимально возможной величины расходуемой энергии при прокатке конкретного типоразмера профиля.

Дано: начальный диаметр прессованной трубы d_0 и конечный диаметр прокатанной трубы d_k , конечное обжатие трубы по диаметру на стане подразделяется между клетями согласно выбранным типам нагрузок и их величинам. Распределение нагрузок определяется следующими двумя типами нагрузок:

- абсолютная нагрузка: относительное обжатие клетки является входной величиной нагрузки;
- относительная нагрузка: для клеток с относительным типом нагрузки, обжатия профиля по диаметру рассчитываются в соответствии с входящими величинами нагрузки по обжатию, умноженные на единственный рассчитанный коэффициент пропорциональности, поддерживающий выбранную относительную нагрузку между клетями.

Относительное обжатие по диаметру в клетке: $\varepsilon_{\varnothing(i)} = (d_{i-1} - d_i) / d_{i-1}$.

Обжатия клетки должны удовлетворять следующему уравнению:

$$d_k = d_0 \cdot \prod_{i=0}^n (1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)), \quad (5.17)$$

где n – число клеток стана.

Учитывая одновременное задание абсолютной и относительной нагрузки по обжатию клетки, коэффициент относительного обжатия был рассчитан таким образом, чтобы удовлетворить нижеследующему уравнению

$$d_k = d_0 \left(\prod_{iAbs} [1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i)] \right) \left(\prod_{iRel} [1 - k_1 \varepsilon_{\varnothing rel}(i)] \right), \text{ где } \varepsilon_{\varnothing abs} - \text{ заданное относительное}$$

обжатие по диаметру в клетки в соответствии с абсолютным типом нагрузки; $\varepsilon_{\varnothing rel}$ – заданное относительное обжатие по диаметру в клетки в соответствии с вектором относительных коэффициентов обжатий.

$$\text{Обозначим } \chi = \frac{d_0}{d_k} \prod_{iAbs} [1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i)], \text{ тогда: } \frac{1}{\chi} = \prod_{iRel} [1 - k_1 \varepsilon_{\varnothing rel}(i)];$$

и в логарифмической форме:

$$-\ln \chi = \sum_{iRel} \ln(1 - k_1 \varepsilon_{\varnothing rel}(i)). \quad (5.18)$$

Уравнение (5.17) может быть преобразовано разложением в ряд Тейлора:

$$\ln(1 - \chi) = -A\chi - B\chi^2, \text{ при } -1 \leq \chi \leq 1.$$

Тогда уравнение (5.18) может быть записано как:

$$-\ln \chi = -A \cdot k_1 \sum_{iRel} \varepsilon_{\varnothing rel}(i) - B \cdot k_1^2 \sum_{iRel} \varepsilon_{\varnothing rel}^2(i). \quad (5.19)$$

Уравнение (5.19) является линейным уравнением второго порядка с одним неизвестным k_1 . Решение этого уравнения выполняется в первом приближении для коэффициента относительного обжатия в клетки. Обжатия по диаметру, где был выбран относительный тип нагрузки

$$\varepsilon_{\varnothing}(i) = k_1 \cdot \varepsilon_{\varnothing rel}(i).$$

Во втором приближении выполняется ввод коэффициента относительного обжатия второго порядка k_2 для компенсации ошибок, заложенных на первом шаге, тогда получается:

$$d_k = d_0 \left(\prod_{iAbs} [1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i)] \right) \left(\prod_{iRel} [1 - k_1(1 - k_2)\varepsilon_{\varnothing rel}(i)] \right). \quad (5.20)$$

Расчет конечного диаметра согласно первому приближенному шагу

$$d_k^* = d_0 \left(\prod_{iAbs} [1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i)] \right) \left(\prod_{iRel} [1 - k_1 \cdot \varepsilon_{\varnothing rel}(i)] \right),$$

тогда уравнение (5.20) может быть записано как

$$d_k = d_k^* \cdot \prod_{iRel} \left[1 + k_2 \frac{1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)}{\varepsilon_{\varnothing}(i)} \right].$$

Преобразованный в логарифмическую форму коэффициент второго порядка относительного обжатия k_2 :

$$k_2 = \frac{\ln \left(\frac{d_k}{d_k^*} \right)}{\sum_{iRel} \left(\frac{1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)}{\varepsilon_{\varnothing}(i)} \right)}.$$

Окончательный коэффициент относительного обжатия клетки:

$$k = k_1(1 - k_2),$$

и величина обжатия в клетки, где был выбран относительный коэффициент обжатия, рассчитывается как: $\varepsilon_{\varnothing}(i) = k \cdot \varepsilon_{\varnothing rel}(i)$,

а в клетки, где была выбрана абсолютная нагрузка по обжатию—

$$\varepsilon_{\varnothing}(i) = \varepsilon_{\varnothing abs}(i).$$

Соответственно диаметр калибра в клетки будет определяться как:

$$d_i = d_{i-1} \cdot (1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)).$$

Таким образом, разработан алгоритм расчета диаметра калибра в каждой клетки вдоль прокатного стана. Алгоритм позволяет создать калибровку с возможностью как равномерного, так и относительного распределения обжатий между клетями стана. Преимуществом алгоритма является возможность фиксировать обжатия в любой клетки. Данная возможность востребована при проектировании калибровки таким образом, что при выводе из работы последних кле-

тей стана существует возможность прокатки нескольких типоразмеров труб (по внешнему диаметру).

Алгоритм распределения вытяжек

При идентификации скоростного режима прокатки профиля необходимо некоторым образом спроектировать распределение вытяжек по клетям стана. В данном случае существует бесконечно большой выбор в допустимом пространстве распределения вытяжек.

При постановке задачи предполагаем, что известно количество клеток редукционного стана n . Каждая i -ая клеть рассматривается как i -ая стадия обработки трубы с известными начальными размерами трубы d_0 и s_0 и известными конечными размерами d_k и s_k . Также считается известным распределение обжатий по диаметру, т.е. известен вектор d_i . Суммарная вытяжка в таком случае равна

$$\lambda_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \lambda_i, \quad (5.21)$$

где λ_i – вытяжка в i -ой клетки:

$$\lambda_i = \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}}{(d_i - s_i)s_i}. \quad (5.22)$$

Распределение вытяжек по клетям редукционного стана должно удовлетворять следующему условию:

$$s_k = \frac{d_k}{2} - \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{(d_0 - s_0)s_0}{\lambda_{\Sigma}}}. \quad (5.23)$$

В результате распределения вытяжек устанавливается режим межклетевых натяжений. В литературе приводится множество методик распределения вытяжек, но они все сводятся к двум случаям: равномерное распределение вытяжки по всем клетям и распределение вытяжки с условием равномерной загрузки электродвигателей клеток. Рационально выполнить распределение вытяжек (и тем самым распределение натяжений) с проверкой условия пробуксовывания или проволакивания трубы в калибре [88, 89]:

$$\left(\frac{\sin \alpha_i}{\mu}\right)^2 \left[0,44 + \left(\frac{1-K}{K} \frac{T_i - T_{i-1}}{a \cdot \bar{p}_i F_i} \right) \right] \leq 1, \quad (5.24)$$

где T_{i-1} , T_i – усилия переднего и заднего натяжений соответственно;

$$T_{i-1} = \pi \cdot (d_{i-1} - s_{i-1}) \cdot s_{i-1} \cdot \sigma_s \cdot z_{i-1} \text{ и } T_i = \pi \cdot (d_i - s_i) \cdot s_i \cdot \sigma_s \cdot z_i; \quad (5.25)$$

α_i – угол контакта, т.е.

$$\alpha_i = 0,6 \arcsin \frac{2l_i}{D_k} \pm \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a \bar{p}_i F_i}{\frac{1-K}{K} T_i - T_{i-1}} \right)^2}}, \quad (5.26)$$

(«+» если $T_{i-1} \geq T_i$ и «-» если $T_{i-1} \leq T_i$);

F_i – площадь контакта, т.е.

$$F_i = 2d_i \sin\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot l_i; \quad (5.27)$$

l_i – длина зоны контакта профиля и валков, т.е.

$$l_i = \sqrt{(d_{i-1} - d_i) \bar{D}}, \quad (5.28)$$

$\bar{D} = 0,5(D_{\max} + D_{\min})$ – средний диаметр конического валка;

\bar{p} – среднее удельное давление, т.е.

$$\bar{p} = \eta_i \cdot \sigma_{si} \cdot \frac{2s_i}{D_i} (1 - \bar{z}_i); \quad (5.29)$$

$$\bar{z}_i = K z_{i-1} + (K - 1) z_i; \quad (5.30)$$

$$K = \frac{\bar{D}}{d_i} + 0,15, \quad (5.31)$$

μ – коэффициент трения по Кулону-Амонтону (при расчетах принимается равным 0,44).

Первоначально вытяжка распределяется равномерно по всем клетям

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\lambda_{\Sigma}}.$$

По вектору первоначальных вытяжек рассчитываются основные параметры процесса, при этом рассчитывается первоначальный вектор необходимых натяжений для получения заданной толщины стенки s_k . При этом учитывается, что

$$z_i|_{i=n} = 0. \quad (5.32)$$

Граничное условие (5.32) говорит о том, что прокатка в последней клетки стана происходит без переднего натяжения.

По вектору вытяжек рассчитывается вектор изменений толщины стенки, (согласно первоначальному вектору вытяжек):

$$s_i = \frac{d_{ki}}{2} - \sqrt{\frac{d_{ki}^2}{4} - \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}}{\prod_{i=1}^n \lambda_i}}; \quad (5.33)$$

и первоначальный вектор скорости трубы: $v_i = v_0 \cdot \prod_{i=1}^n \lambda_i$.

Рассчитывается вектор необходимых межклетевых натяжений. Вектор натяжений рассчитывается в обратном порядке (с граничного условия (5.32)), путем решения квадратного уравнения относительно натяжения z_{i-1} :

$$\begin{aligned} & -0,042972 \cdot z_{i-1}^2 + (0,082085 - 0,205875 \cdot \varepsilon - 0,2797 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}) \cdot z_{i-1} + \\ & \frac{\Delta s}{d_{i-1}} - 0,041203 + 0,183877 \cdot \varepsilon + 0,321691 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} + -0,176 \cdot \varepsilon^2 - \\ & -0,629556 \cdot \left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}\right)^2 + 0,001244 \cdot \varepsilon \cdot v - 0,776889 \cdot \varepsilon \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} = 0, \end{aligned} \quad (5.34)$$

где степень деформации

$$\varepsilon_i = \frac{\frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \cdot B}{\frac{s_i}{d_i} \cdot \left(1 - \frac{s_i}{d_i}\right)} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad (5.35)$$

скорость деформации

$$\xi_i = \frac{\frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \cdot v_i \cdot B}{\frac{s_i}{d_i} \cdot \left(1 - \frac{s_i}{d_i}\right) \cdot 5,4 \sqrt{0,5 \bar{D} \cdot (d_{i-1} - d_i)}}, \quad (5.36)$$

$$B = 0,87 \frac{s_i}{d_i} \left(2 - \frac{s_i}{d_i}\right) + 0,9 \cdot \bar{\varepsilon}^3 \cdot \frac{s_i}{d_i}.$$

Получен первоначальный вектор параметров процесса прокатки. Далее данные поступают в температурную модель непрерывного процесса прокатки (параграф 5.2). Производится расчет вектора температуры и расчет вектора сопротивления деформации.

После первоначального расчета вектора натяжений, начиная с последней клетки стана, происходит проверка условия (5.24). В случае нарушения условия проволакивания или пробуксовывания клетки выполняется уменьшение вытяжки в клетки, которая не прошла условия (5.24), например, уменьшение вытяжки вдвое. Далее выполняется вторая итерация с распределением вытяжек следующим образом:

$$\lambda_i = \sqrt[n-m]{\frac{\lambda_{\Sigma}}{\prod_{j=1}^m \lambda_j}},$$

где m – число итераций, при которых произошло перераспределение вытяжки; j – номер клетки, в которой произошло перераспределение вытяжки (то есть та клетка, в которой не выполнилось условие (5.24)).

Итерационная процедура продолжается до тех пор, пока система уравнений не удовлетворит условиям (5.23) и (5.24).

После удовлетворительного распределения вытяжек и натяжений рассчитываются катающие диаметры валков и определяется частота вращения валков:

$$n_i = n_1 \cdot \frac{D_{k1} \cdot \mu_{\Sigma i}}{D_{ki} \cdot \mu_1}.$$

Тогда коэффициент нарастания частоты вращения валков $k_{ni} = \frac{n_i}{n_1} = \frac{D_{k1} \cdot \mu_{\Sigma i}}{D_{ki} \cdot \mu_1}.$

Модель чувствительностей

Для того чтобы выполнить «он-лайн» управление процессом прокатки, требуется регулирование параметров управления посредством устройств измерения, способных «отслеживать» неизбежные «помехи» средних значений, воздействующих на процесс прокатки и на качество, связанное с получением разнотолщинности по длине трубы и заданных контрольных температур в допустимых технологических рамках.

Должны быть вычислены значения ∂MRP – разность между измеренными и расчетными целевыми значениями параметров прокатки (MRP) и соответствующего изменения параметров управления ∂CP . С этой точки зрения коэффициент чувствительности f параметра прокатки MRP в отношении соответствующего параметра управления CP может быть рассчитан как частная производная, вычисленная в рабочей точке (рис. 5.9):

$$f = \frac{\partial MRP}{\partial CP}.$$

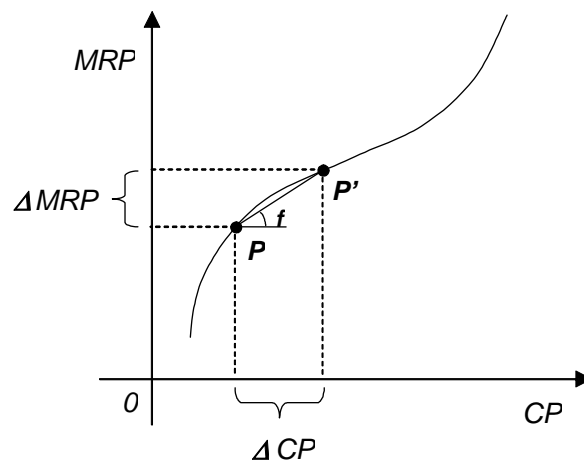


Рис. 5.9. Упрощенная линеаризация коэффициента чувствительности

Такие чувствительности являются быстрой сетевой реакцией к неизбежным ошибкам в расчете основных технологических параметров процесса, которые исполняются системами конечного управления на уровне 1.

Формальное выражение такой функции управления параметра прокатки вообще неопределенно. Эта трудность может быть легко преодолена и оценка

такой частной производной может быть выполнена линеаризацией функции в окрестности рабочей точки P . С этим предположением может быть выполнено быстрое вычисление вышеупомянутого отношения приращений контролируемого параметра, увеличивая значения управляемых параметров прокатки, связывающих рабочую точку P (текущее состояние) и требуемое изменение параметров управления, соответствующее новой рабочей точке P' .

Для оценки чувствительности в отношении только одного параметра вычисление должно быть выполнено, «закрепляя» все другие параметры:

$$\Delta MRP = MRP_{\text{измер}} - MRP_{\text{целевое}};$$

$$\Delta CP = CP_{\text{измер}} - CP_{\text{целевое}}.$$

Изменение вычисляется от текущих условий измерений посредством тех же самых моделей процесса расчета уставок (в частности натяжений и сопел межклетевого охлаждения).

Коэффициент чувствительности может быть рассчитан как отношение между вышеупомянутыми линейными изменениями параметров:

$$f = \frac{\Delta MRP}{\Delta CP}.$$

Процесс разработки чувствительностей на данной стадии стоит считать предварительным, так как заранее не известен состав управляющего оборудования, состав системы базовой автоматики и набор контрольно-измерительного оборудования.

Предварительно можно утверждать, что в состав контрольно-измерительного оборудования будет входить пирометр на выходе профиля из непрерывного стана и устройства, измеряющие толщину стенки трубы. В соответствии с этим предположением возможно осуществить контур обратной связи второго уровня (уровень АСУТП) через следующие группы коэффициентов чувствительностей:

– коэффициент чувствительности для динамического управления температурой конца прокатки;

– коэффициент чувствительности для динамического управления толщиной стенки трубы.

Коэффициент чувствительности для динамического управления температурой конца прокатки

Температурные коэффициенты чувствительности для динамического управления температурой конца прокатки уровнем 1 рассчитываются моделью чувствительностей при исполнении контура обратной связи уровня 2 стана непрерывной прокатки. Также коэффициенты чувствительности циклически обновляются моделью во время прокатки. Частота обновления чувствительностей зависит от инерционности систем измерения и исполнительных механизмов.

Можно выделить два вида температурных коэффициентов чувствительностей:

– чувствительности межклетевого охлаждения $\frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial H_i}$;

– чувствительности скорости $\frac{\partial(\partial T_{\text{кп}}/\partial H)}{\partial v}$ для каждого коллектора межклетевого охлаждения и $\frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial v}$ для прямого воздействия на температуру конца прокатки.

Коэффициент чувствительности рассчитывается по эталонным значениям, поэтому входными данными для модели расчета чувствительностей является эталонная схема коллекторов межклетевого охлаждения и эталонное значение скорости прокатки. Под эталонной схемой коллекторов и эталонным значением скорости понимаются первоначальные значения, которые используются для первоначальной настройки для соответствующей зоны профиля.

Чувствительности системы межклетевого охлаждения

Модель чувствительностей системы межклетевого охлаждения использует для оценки изменения температуры профиля $\Delta T_{\text{кп}}$ пирометр на выходе из последней клетки непрерывной группы по состоянию закрыто/открыто j -го коллектора межклетевого охлаждения, где j – код коллектора, из-за элемен-

тарного изменения только одного состояния системы межклетевого охлаждения ΔH_j .

Коэффициенты используются для оценки изменения температуры профиля на выходном пирометре из группы клеток в отношении состояния открыто или закрыто рассматриваемого коллектора по формуле

$$\Delta T_{KP} = (T_{KP} - T_{KP0}) = \frac{\partial T_{KP}}{\partial H_j} (H_j - H_{j0}), \quad (5.37)$$

где T_{KP0} – температура на выходе из последней клетки при эталонных условиях; $H_j = 0$ – если статус коллектора – «закрыто»; $H_j = 1$ – если статус – «открыто».

Чувствительности рассматриваются в статичных устойчивых условиях, т.е. предполагается, что изменение состояния открыто/закрыто коллекторов межклетевого охлаждения сохраняется в течение продолжительного времени, следовательно, их воздействие на температуру конца прокатки профиля полностью сохраняется.

Если уровню 1 необходимо оценить эффект в переходных условиях, он должен оценить время транспортировки для каждой части профиля от выбранного коллектора до пирометра на выходе из группы клеток.

Коэффициенты чувствительности скорости

Так как скорость прокатки может меняться, то время прохождения под каждым коллектором тоже меняется. Поскольку вышеуказанные коэффициенты чувствительности для межклетевых коллекторов охлаждения рассчитываются по эталонной скорости, перепад температур в результате охлаждения каждым коллектором должен быть компенсирован из-за изменения скорости прокатки по отношению к эталонному значению.

Поэтому должны рассматриваться следующие коэффициенты чувствительности:

$$f_v = \frac{\partial \left(\frac{\partial T_{KP}}{\partial H} \right)}{\partial v}, \quad (5.38)$$

для использования оценки изменения чувствительности $\frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial H_j}$ по отношению к скорости прокатки Δv .

Объединяя уравнения (5.37) и (5.38), изменения конечной температуры прокатанного профиля на выходе из последней клетки из-за изменения статуса j -го коллектора межклетевого охлаждения и скорости прокатки могут быть рассчитаны:

$$\Delta T_{\text{кп}} = T_{\text{кп}} - T_{\text{кп}0} = \left[\frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial H_j} + \frac{\partial \left(\frac{\partial T_{\text{кп}}}{\partial H_j} \right)}{\partial v} (v - v_0) \right] (H_j - H_{j0}), \quad (5.39)$$

где $T_{\text{кп}}$ – пересчитанная температура профиля на выходе из последней клетки; $T_{\text{кп}0}$ – температура на выходе из последней клетки при эталонных условиях; $H_j = 0$ – если статус коллектора – «закрыто»; $H_j = 1$ – если статус – «открыто»; v_0 – эталонная скорость прокатки; $\Delta v = v - v_0$ – изменение скорости прокатки, удовлетворяющее целевому значению установки.

Для оценки изменения температуры профиля из-за состояния «открыто» или «закрыто» всех предыдущих состояний коллекторов межклетевого охлаждения и изменения скорости прокатки целесообразно предположить линейность (суммарность всех воздействий).

Коэффициент чувствительности для динамического управления толщиной стенки трубы

Использование ультразвуковых толщиномеров значительно облегчает измерение толщины стенок труб, изготавливаемых методом экструзии и прокатки. Такие измерения позволяют выявить нарушения характеристик труб по толщине их стенок и обеспечить непрерывный и автоматический контроль концентричности труб без необходимости их разрезания или остановки процесса производства. При этом ультразвуковые толщиномеры позволяют точно измерять толщину стенок по всей длине трубы.

Для непрерывных поточных измерений толщины стенок металлических труб рекомендуется толщиномер модели 25MX PLUS (GE Panametrics). Он обеспечивает проведение измерений в одной или нескольких точках по окружности трубы, что позволяет построить обратную связь второго уровня для корректировки вектора натяжений для получения стенки трубы в заданных допусках. Модель чувствительностей определяющего вектора межклетевых натяжений для оценки изменения толщины прокатанной трубы использует показания толщиномера, установленного за последней клетью непрерывного стана, по отношению к отдельно взятому значению натяжения в межклетевом промежутке из-за элементарного изменения только одного значения межклетевого натяжения z_i .

Коэффициенты чувствительностей используются для оценки изменения толщины стенки трубы в отношении набора межклетевых натяжений и рассчитываются по формуле

$$\Delta s_k = (s_k - s_{k0}) = \frac{\partial s_k}{\partial z_i} (z_i - z_{i0}), \quad (5.40)$$

где s_{k0} – толщина стенки на выходе из последней клетки при эталонных условиях (определенном векторе натяжений); z_i – натяжение в i -ом межклетевом промежутке.

Таким образом, создан алгоритм, позволяющий производить коррекцию уставок по обратной связи второго уровня.

5.5. Структура системы управления совмещенным процессом прессования-прокатки-регламентированного охлаждения профилей и труб

Основой получения эффективного решения при создании комплексной системы управления технологическим процессом является возможно более точное формализованное описание поведения системы. Поэтому методология системного анализа предусматривает непрерывное улучшение ранее принятых решений за счет адаптации исходной модели к условиям функционирования:

накопления информации о текущем состоянии выхода для оценки рассогласования; подготовки рекомендаций о месте, времени и форме управления, его вероятных последствиях на выходе объекта. Этому принципу в полной мере отвечает многослойная концепция адаптации управления производством.

В интегрированной системе управления выделяются четыре уровня.

Первый уровень взаимодействует с объектом непосредственно в реальном времени процесса. Обработанные с датчиков сведения могут обрабатываться (сглаживаться, усредняться, линеаризоваться и т.д.) до передачи их в систему принятия решения для хранения и последующего использования. В задачу текущего контроля событий входит обнаружение событий, влияющих на решения по управлению. Эти события могут инициировать выдачу управляющей воздействия, выдачу сигнала на завершение предшествующего задания, введение новых значений управляемых параметров, изменение режима работы. Функция прямого регулирования первого уровня реализует цель и стратегию, определенную на втором уровне.

Второй уровень устанавливает цель или задания, подлежащие реализации на первом уровне. В нормальном режиме целью может быть оптимальное управление на основе принятой математической модели. В аварийных ситуациях могут получать приоритет модифицированные модели для пересчета нарушенных планов. Второй уровень определяет остановки для управляющих устройств первого уровня, которые реализуются через заранее определенную последовательность действий.

Третий и четвертый уровень систем автоматизации предприятий связывает в единый комплекс цеховые или агрегатные вторые уровни. Такая общая связь позволяет построить эффективную систему планирования производства и осуществить сквозной анализ качества.

В литературе часто встречаются решения по созданию комплексных систем управления непрерывными трубопрокатными станами [153, 154]. Основные задачи таких систем: быстрая настройка стана; динамическое регулирование натяжений за счет управления скоростей; уменьшение длины утолщенных

концов прокатываемой трубы; сопровождение прокатываемого профиля с привязкой технологических параметров к металлургической длине для последующего анализа; избежание превышения нагрузки на оборудование стана.

В работе [153] АСУ ТП спроектирована из двух взаимосвязанных уровней. Второй уровень содержит в себе базу данных с таблицами программ прокатки, которые создаются (рассчитываются) заранее. Программа прокатки выбирается исходя из параметров заготовки, калибровки валков стана и необходимой конечной геометрии прокатанной трубы. Таким образом, регулирующим воздействием системы является задание и корректировка угловых скоростей вращения двигателей главных приводов стана во время прокатки, что позволяет изменить величину натяжения между клетями и соответственно управлять точностью проката. К недостаткам построения такой системы можно отнести высокие требования к точности нагрева и перепадам температуры по длине заготовки; невозможность создания новой программы прокатки «на лету» в случае изменения условий прокатки (недостаточный нагрев трубной заготовки, несоответствие геометрическим характеристикам трубной заготовки и т.д.); невозможность управления температурой трубы.

Описанных недостатков лишена система управления трубопрокатным станом компании «Kocks» [154]. Помимо системы регулирования натяжений по длине трубы для уменьшения длины утолщенных концов в состав системы входит модуль, позволяющий производить прокат со «свободным размером». Программа прокатки создается отдельно на каждую прокатываемую трубу или партию труб, что позволяет прокатывать трубы с различным внешним диаметром (в небольших диапазонах) и толщиной стенки из одного размера трубной заготовки. Это достигается за счет управления регулируемыми клетями.

Как было отмечено выше, одной из основных проблем прокатки на редуционно-растяжных станах является повышенный расход металла за счет обрезки утолщенных концов труб. Известны способы, позволяющие сократить (или избежать) утолщение концов труб [153, 154] за счет применения большего

натяжения во время прокатки головы и хвоста полосы. Также определенный вклад вносит неравномерность температуры трубной заготовки по ее длине.

Для предлагаемой в данной работе композиционной структуры стана совмещенного прессования и редуционно-растяжной прокатки труб и сплошных профилей, вышеописанные методы построения систем автоматического управления не подходят по многим причинам.

Ниже предложен вариант построения системы управления процессом редуционно-растяжной прокатки, позволяющий избежать вышеуказанных проблем.

Автоматическая система управления технологическим процессом совмещения прессования и непрерывной прокатки простых сплошных профилей и труб состоит из двух уровней: базовый уровень (описан в параграфе 2.2) и уровень 2. Уровень 2 АСУ ТП построен на математических моделях процесса непрерывной прокатки профилей. В состав уровня 2 входят следующие взаимосвязанные математические модели:

- модель сопротивления деформации;
- модель управления температурой на промежутке пресс – непрерывный стан;
- модель температуры непрерывного стана;
- модель температуры установки контролируемого охлаждения;
- модель распределения обжатию профиля по клетям стана;
- модель расчета уставок для первоначальной настройки стана;
- модель расчета коэффициентов чувствительностей для обновления настройки.

Упрощенная схема функциональной связи моделей второго уровня и базового уровня (уровня 1) АСУ ТП приведена на рис. 5.10. Задачей первого уровня является процесс обработки конечных данных (уставок) для приведения в действие исполнительных механизмов оборудования непрерывного прокатного стана. Вектор уставок состоит из следующих установочных параметров:

- уставки на межклетевые натяжения;

- уставки на частоту вращения валков;
- шаблон межклетевых коллекторов охлаждения;
- шаблон коллекторов охлаждения установки предварительного охлаждения;
- статус тепловых экранов установки предварительного охлаждения.

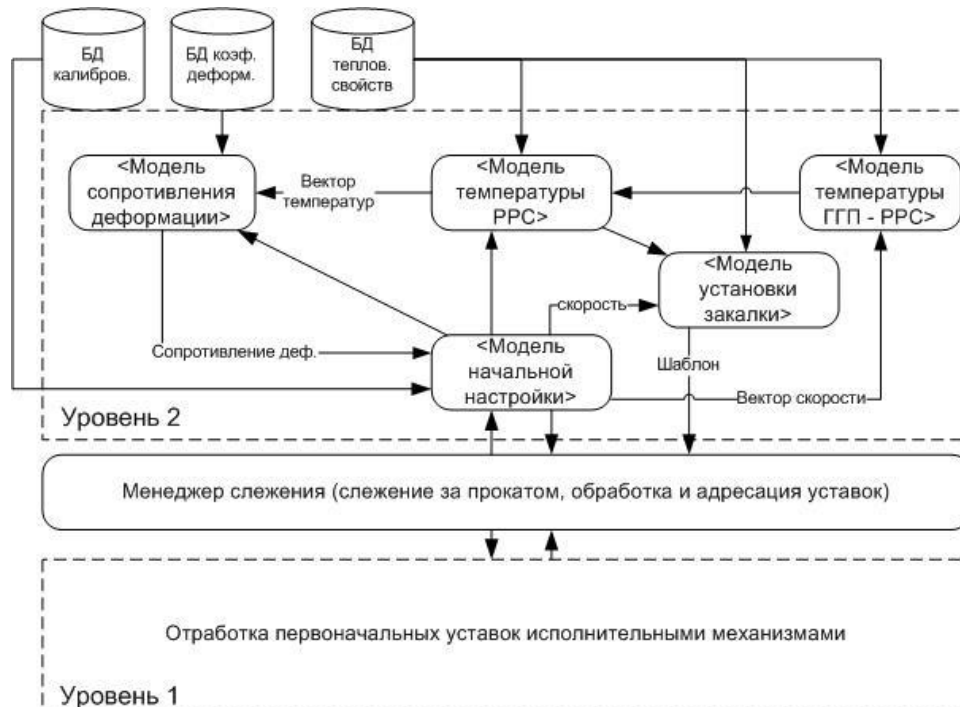


Рис.5.10. Функциональная связь моделей АСУ ТП

Вектор таких уставок не является статичным во время прокатки каждого отдельного профиля. Во время прокатки происходит измерение контролируемых параметров на уровне 1, которые посредством алгоритмов менеджера слежений (алгоритмы этой системы отслеживают координаты профиля во время его движения вдоль линии стана) привязываются к координатам стана. Вектор измерений для осуществления коррекции по обратной связи уровня 2 состоит из следующих параметров (рис. 5.11):

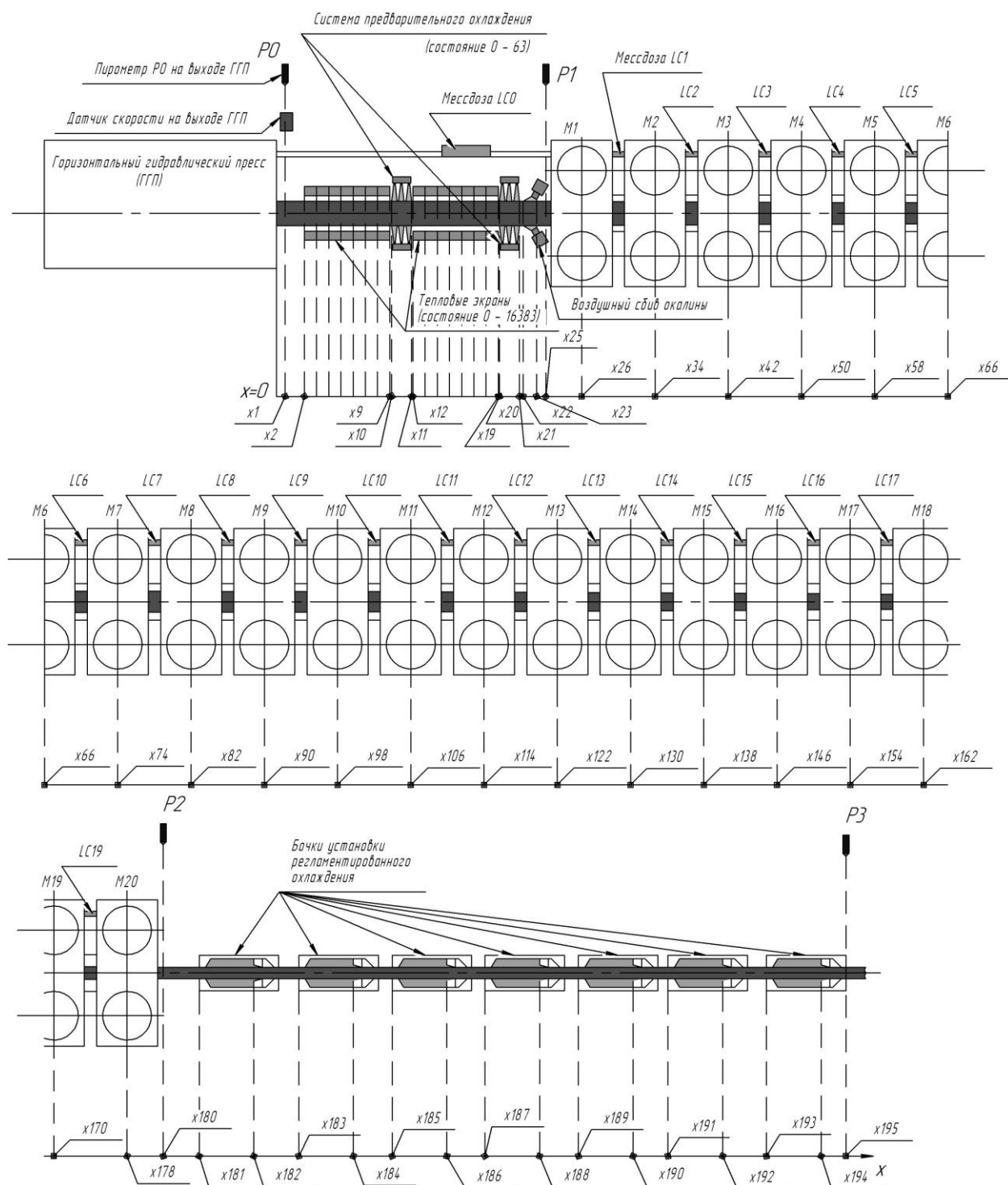


Рис. 5.11. Структурная схема прокатного стана

- показания пирометра P0 – температура прессования;
- скорость выхода профиля из пресса;
- показания пирометра P1 – температура начала прокатки;
- показания пирометра P2 – температура конца прокатки;
- показания пирометра P3 – температура охлажденного профиля.

Данные измерений менеджером слежения привязываются к продольной координате прокатываемого профиля. Начальная координата $x = 0$ соответствует точке выхода прессованного профиля из горизонтального гидравлического пресса, и соответственно скорость на участке $x \in [x_0, x_{26}]$ соответствует скорости выхода профиля из пресса: $v|_{x \in [x_0, x_{26}]} = v_{\text{пресс}}$.

Скорость профиля на участке $x \in [x_{26}, x_{178}]$ является переменной и будет различной для каждого межклетевого промежутка в зависимости от вытяжки профиля в каждой клетке: $v_i = v_{\text{пресс}} \cdot \prod_{i=0}^{20} \lambda_i$.

Зная системное время замера любого параметра и координаты всех клеток, можно привязать значение каждого параметра к конкретной точке профиля.

В состав системы входит база данных, которая структурно состоит из отдельных баз данных:

- база данных калибровки валков, установленной в данный момент на стане;
- база данных коэффициентов сопротивления деформации прокатываемого металла;
- база данных теплофизических свойств прокатываемого металла.

Работа системы управления технологическим процессом является многоуровневой (в составе математических моделей). На каждом уровне управления достигается группа целевых технологических показателей процесса. Выделим два основных уровня управления.

Первый уровень выполняет управления по двум параметрам: температура конца прокатки (пирометр P2) и толщина стенки трубы на выходе из стана горячей прокатки (управляется посредством моделей чувствительностей). При управлении температурой конца прокатки система имеет несколько регуляторов: шаблон системы межклетевого охлаждения, шаблон системы предварительного охлаждения и скорость прессования. Система управления шаблонами

охлаждения имеет ограниченный диапазон управления температурой конца прокатки, который зависит от эффективности систем охлаждения.

Как было описано выше, прессование профиля может происходить, как с увеличением температуры, так и с её понижением. Уровень отклонения температуры при прессовании связан со многими параметрами, в частности, начальным нагревом прессуемого слитка, нагревом прессового инструмента, скоростью прессования и т.д. Таким образом, при управлении изменением температуры можно выделить один управляющий параметр для построения АСУ ТП – это скорость прессования. Следовательно, первая стадия управления в АСУ ТП построена из следующих шагов:

- 1) происходит прессование с заданной исходной скоростью прессования;
- 2) выполняется замер температуры прессования (пирометр P0, см. рис. 5.11);
- 3) математическая модель системы предварительного охлаждения оценивает возможность достижения заданной температуры начала прокатки на пирометре P1 (см. рис. 5.11). После успешного завершения работы математической модели системы предварительного охлаждения устанавливаются шаблоны тепловых панелей и сопел охлаждения (см. блок схему на рис. 4.5) и запускается выполнение следующего шага (шаг 4). В случае ошибки, свидетельствующей о невозможности достичь заданной температуры (см. блок схему на рис. 4.5), генерируется сообщение в АСУ прессы об увеличении/уменьшении скорости прессования. Система выполняет управление по конечно рассчитанным уставкам до их обновления и переходит к шагу 1;
- 4) выполняется расчет скоростного и деформационного режима прокатки совместно с моделью температуры непрерывного стана, опираясь на текущую скорость прессования. Модель оценивает возможность получения заданной температуры конца прокатки, достаточной для выполнения заковки профиля. В случае успешной проверки возможности достижения заданной температуры модель переходит к шагу 5. В случае установления

невозможности достижения заданной температуры модель генерирует сообщение в АСУ пресса об увеличении/уменьшении скорости прессования. Система выполняет управление по конечно рассчитанным уставкам до их обновления и переходит к шагу 1;

5) моделью установки контролируемого охлаждения выполняется расчет уставок оборудования установки охлаждения.

Второй уровень выполняет управления по температуре конца прокатки (пирометр P2). Во втором уровне управления температурой конца прокатки система не имеет возможности регулирования скоростью прессования. Второй уровень управляет регуляторами: шаблон системы межклетевого охлаждения, шаблон системы предварительного охлаждения при этом использует модели расчета чувствительностей и запускается после окончательной уставки по скорости прессования, выполненной на первом уровне. Этот уровень управляет шаблонами систем охлаждения, и в случае выпадения за диапазон регулирования запускается первый уровень управления.

В качестве конкретного примера численной реализации алгоритма управления совмещенным процессом прессования–редукционно-растяжной прокатки рассмотрен расчет технологических и управляющих параметров при изготовлении горячекатаных труб 16х1,5 из коррозионностойкой стали из горячепрессованной заготовки. Результаты расчета представлены в прил.4.

5.6. Выводы

1. Созданные математическая модель температурного режима совмещенного процесса прессования – прокатки – термической обработки труб, структура системы и алгоритм управления формоизменением сечения трубы и температурой трубы на входе в закалочное устройство, а также программное обеспечение этого алгоритма, проверенное на конкретном числовом примере, показывают принципиальную и техническую возможность прямого совмещения данных технологических операций, с целью получения труб, в частности из корро-

зионностойких сталей, подготовных размеров без нагревов (кроме прессового) и промежуточных термических и химических обработок.

2. Предложенная двухуровневая система автоматического управления температурно-скоростным режимом и натяжениями как на выходе из пресса, так и межклетевыми натяжениями на выходе из прокатного стана гарантирует обеспечение требуемой толщины стенки трубы.

3. На конкретном примере прокатки трубы и коррозионностойкой стали аустенитного класса показана возможность существенного увеличения скорости редуционно-растяжной прокатки. Установка управляемых экранов и системы водяного охлаждения труб по ходу ее передачи от пресса к стану и при движении вдоль линии прокатки устраняет опасность перегрева.

4. Структура системы и алгоритм управления, быстро реализуемый традиционными программными средствами, позволяет до минимума сократить количество датчиков оперативной информации, что повышает быстродействие и надежность управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первоначально заявленная фирмой Danieli концепция «адапт-завода» [1] к настоящему времени существенно видоизменилась и чаще всего в понятие мини-завода укладывается вполне определенная структура металлургического производства: участок подготовки лома и скрапа, дуговая сталеплавильная печь, печь-ковш или агрегат комплексной обработки стали (АКОС), радиальная (криволинейная) МНЛЗ, один или два прокатных стана. Как правило, на этих заводах даже не предполагается переработка оксиджелезосодержащих материалов, т.е. не предусматривается возможность проведения восстановительных плавов. Отсюда вполне оправданное мнение о непригодности мини-заводов к получению особо качественной металлопродукции. Переплавка металлолома позволяет снизить энергозатраты и обеспечить быструю окупаемость капитальных затрат при сравнительно малых объемах производства. Высококачественная сортировка и разбраковка ломов черных металлов обходится дорого, поэтому не приживается на строящихся в последние годы мини-заводах. Металлургический цикл этих предприятий не дает возможности избавиться от многих легирующих элементов и примесей, присутствующих почти неизбежно в любом железном ломе, таких как медь и тугоплавкие металлы. Затруднено получение низко- и безуглеродистой стали, так как применение современных методов и оборудования обезуглероживания стали по соображениям рентабельности производства доступно только для предприятий крупнотоннажного производства.

Крупнотоннажное металлургическое производство без сомнения является основой индустрии и определяет уровень промышленного потенциала страны. Но как бы ни было совершенно, оно не в состоянии решать актуальные проблемы быстрого расширения сортаментных рядов металлопродукции, рентабельного выпуска малотоннажных партий профилей и труб специального назначения, организации малоотходного производства, максимального энергосбережения, эффективной переработки отходов и, в частности, техногенных образований самой металлургии. Экономическая эффективность этого производства

определяется объемом выпуска металлоизделий и повышается с ростом этих объемов и производительности. Чем выше последний, тем ниже маневренность и сужен сортамент как профильный, так и марочный. Строительство новых и реконструкция существующих крупных предприятий с учетом мировых достижений в области металлургических машин и технологий являются затратными, характеризуются длительными сроками окупаемости капитальных вложений и уже никак не развивают инициативу руководства в расширении сортамента и в обеспечении условий переналаживаемости агрегатов и систем автоматического управления.

Условиями выживания миниметаллургических предприятий являются высокая стоимость и востребованность продукции, возможность за счет быстрой переналадки расширять сортамент, предельное энерго- и ресурсосбережение, малые капитальные затраты на строительство и производственные площади, применение простейших систем автоматического управления, контроля и поддержки баз производственных данных.

К сожалению, композиционная структура, технологические приемы, организация, автоматическое управление и даже накопленный производственный опыт персонала крупнотоннажного металлургического производства малопригодны для организации и эффективного функционирования металлургических заводов любого профиля. Это легко понять из описанного в книге и уже проектируемого в настоящее время участка для изготовления заготовок проволоки и труб для атомной энергетики из нестабилизированной безуглеродистой коррозионностойкой стали.

В разработке общего для всего комплекса технологического задания выполненные исследования и конструктивные решения являются принципиальным разделом, без которого вся разработка металлургического производства теряет смысл. Включение в технологию прессового передела удачно связывает общеметаллургические переделы с финишными операциями изготовления проволочной и трубной заготовок. Если наиболее дешевыми способами удастся получить либо сплошной (на горизонтальной МНЛЗ с большим шагом вытягивания) легко разделяемый на мерные длины по спаям шагов слиток, либо по-

лую, замороженную на трубчатый кристаллизатор, заготовку, то применять в качестве первого горячего передела что-либо, кроме прессования, нецелесообразно. Прессование снимает все ограничения по пластичности металла заготовки и дает возможность без переналадок переходить от одного типоразмера профиля к другому. Только прессованием можно изготовить заготовку под последующую редуционную прокатку с концевыми пробками и, следовательно, с вакуумированием полости, предотвращающим окисление до конца горячей обработки. Легко управлять температурой профиля скоростью прессования.

Тепло прессового передела в полной мере используется при совмещенной прокатке. Однако известные конструкции редуционных станов мало пригодны для прямого совмещения с прессованием из-за низкой скорости прокатки, мягкой механической характеристики приводов, несовершенства системы управления, отсутствия систем управления тепловым режимом прокатки.

В современной конфигурации прокатных сортовых и редуционных клетей с точки зрения снижения металлоемкости почти бесполезно уменьшать массу самих клетей, сохраняя громоздкий электромеханический привод, не позволяющий применять произвольный режим чередования клетей. Предложенный здесь гидропривод кардинально решает все проблемы компактирования прокатного оборудования. Стоимость стана резко снижается за счет устранения тиристорных и частотных преобразователей. Если на участке установлен гидравлический пресс с НАС, то гидроприводной прокатный стан уже оказывается обеспечен рабочей жидкостью.

Новые исследованные системы калибров так же способствуют повышению переналаживаемости прокатного оборудования. При прокатке проволочной заготовки из прессованного профиля может в основном использоваться система квадрат-квадрат, в калибрах которой размер меняется в широких пределах смещением подушек без параллельного смещения осей валков. При трубной прокатке круглый калибр конических валков оказывается универсальным, то есть пригодным как для прокатки трубы, так и концевых пробок.

Исследованный тепловой режим совмещенной с прессованием редуционной прокатки и предложенная система управления показывают реальную

возможность закалки труб в линии стана. Общая же идеология малотоннажного производства заготовок проволоки и труб из безуглеродистых аустенитных сталей, получаемых восстановлением из рудных материалов металлическими восстановителями, позволяет закалку рассматривать как конечный передел в получении проката предчистовых размеров. Используемый зачастую отжиг для выделения специальных карбидов [155] может быть вообще отменен благодаря практически полному отсутствию углерода в стали. Катаные заготовки остаются светлыми, не требуют дополнительной ни термической, ни химической обработки, и могут сразу передаваться на финишную холодную обработку.

Представленные в книге материалы являются достаточными для технологического проектирования совмещенных комплексов прессования-прокатки-термической обработки в составе мини-металлургических предприятий для рентабельного производства широкосортаментной и высокотехнологичной продукции.

Показанный здесь новый вариант композиционной структуры комплекса оборудования для прямого совмещения переделов обработки пригоден для малотоннажного широкосортаментного производства как мелкого сорта, так и труб.

Компактные гидроприводные сортовые редуционный клетки, уже проверенные на практике, должны вызвать интерес разработчиков прокатного оборудования, поскольку даже пристрастный поиск их недостатков вряд ли увенчается успехом. Современные сортовые клетки с жестко заданным чередованием, как бы ни были конструктивно совершенны и надежны, не дают возможности применить наиболее эффективные по вытяжной способности системы калибров квадрат-шестиугольник-квадрат и квадрат-овал-квадрат из-за необходимости кантовок на 45 градусов. Двухвалковые гидроприводные клетки не имеют ограничений по режимам кантовок и, следовательно, допускают использование любых систем калибров при предельно малом межклетевом промежутке. Стоит обратить внимание и на автосогласование индивидуального привода валков, предотвращающее как изгибы концов проката, так и их торцевые раскрытия. Это повышает работоспособность проводок, упрощает их конструкцию и об-

служивание, делает ненужными летучие ножницы на выходе каждой группы клетей.

Подробно рассмотренный в книге процесс прокатки в четырехвалковых калибрах конических валков может выглядеть как настоятельная рекомендация к их широкому промышленному использованию в сортовой редуционной прокатке, особенно в тех случаях, когда стремятся повысить вытяжную способность калибров и сократить количество клетей, добиваясь снижения металлоемкости и высвобождения производственных площадей. Без сомнения, снижение или подавление уширения при прокатке в многовалковых калибрах обостряет текстуру не только деформации, но и рекристаллизации. Это, наверное, можно отнести к недостаткам. Однако выявленные достоинства прокатки прутков и труб в квадратных и круглых калибрах конических валков должны склонить мнение опытных и грамотных прокатчиков к признанию целесообразности и широкого промышленного применения. Если при создании, в частности, мини-металлургического производства есть возможность выбирать конструкцию клетей и способ прокатки, то в первую очередь следует обратить внимание на следующие преимущества прокатки в калибрах конических валков:

- всегда реализуется благоприятная для пластичности схема напряженного состояния и гарантированно исключается разрушение полос и труб из металлов и сплавов, за которыми закрепилось мнение о низкой пластичности при всех видах прокатки;
- уменьшается поперечная составляющая контактного давления и повышается жесткость клетки; появляется широкая перспектива эффективного применения грибовидных (консольных) валков, упрощающего конструкцию прокатной клетки;
- появляется возможность регулирования размеров калибров в широких пределах без параллельного смещения осей валков лишь осевым перемещением подушек по направляющим замкнутого цельнокованого корпуса клетки; повышаются коэффициенты переточки (перешлифовки) круглых калибров без изменения начальных диаметров валков;

- становится доступной прокатка круглых сплошных профилей и труб по схеме круг-круг в калибрах четырех конических валков, ручьи на которых выполнены без эксцентриситета и без развала, лишь с незначительным скруглением реборд;
- обеспечивается упруго-пластическое кручение полос и труб, прокатываемых по схемам круг-квадрат и круг-круг, дающее возможность при больших суммарных обжатиях и определенных температурно-скоростных условиях прокатки формировать спиральную текстуру металла, благоприятно отражающуюся на тангенциальной прочности профилей и труб;
- снижаются на 10...15 % контактные давления и, следовательно, усилие прокатки благодаря действию крутящего момента, приложенного к полосе при непрерывной прокатке в калибрах конических валков за счет поперечной составляющей сил контактного трения в зоне обжатия;
- устраняется присущий традиционной редуциционной прокатке труб дефект «граненость» благодаря малому уширению и отсутствию тангенциальной осадки стенки трубы в выпусках калибров.

Результаты выполненных исследований нового способа прокатки и представленные в книге методики, проверенные на расчетах конкретных технологических процессов, позволяют осуществить технологическое проектирование совмещенного процесса прессования–прокатки–регламентированного охлаждения. Достоверность результатов расчета основных технологических параметров частично проверена сопоставлением с опытными данными, полученными на оригинальной экспериментальной установке.

Упрощенная математическая модель, построенная на основе уравнений энергетического баланса, дает возможность рассчитать все технологические параметры в квадратном калибре четырех конических валков заготовки круглого поперечного сечения.

Созданная на базе МКЭ численная модель редуционно-растяжной прокатки труб в круглых калибрах четырех конических валков позволяет строить поля напряжений и деформаций в объеме зоны обжатия. Регрессионные статистически обоснованные уравнения, полученные на базе конечно-элементной

модели, дают возможность описать изменения толщины стенки трубы и рассчитать размеры катающих диаметров. Математическое моделирование в конечно-элементной постановке распространено и на прокатку сплошных профилей по схемам круг–квадрат, квадрат–круг, квадрат–квадрат, круг–круг, что дает возможность определять углы скручивания профилей и соответственно осуществлять угловую настройку клетей непрерывной группы.

Конечно-разностным методом дано математическое описание теплового режима обрабатываемых профилей и труб с момента выхода заготовки из прессовой матрицы до завершения регламентированного охлаждения проката. Эта модель позволила создать алгоритм и предложить новую структуру системы управления температурно-скоростным режимом и режимом натяжений проката между прессом и станом и между клетями, что показывает реальную возможность прямого совмещения прессования, прокатки и термической обработки в рамках рассмотренной в книге композиционной структуры миниметаллургического комплекса. Управление таким комплексом, даже при наличии самых совершенных алгоритмов и программ, становится невозможным без описания закономерностей изменения величины сопротивления деформации при больших степенях, при скоростном упрочнении и динамическом разупрочнении.

Необходимую и достаточную информацию о закономерностях изменения предела текучести реального металла при больших (как при прессовании) деформациях в зависимости от температуры, скорости деформации и длительности пауз между обжатиями можно получить с помощью нового торсионного пластометра, впервые реализующего дифференциальный метод Мура при испытаниях на кручение, аппаратное и программное обеспечение которого представлено в книге. Пластометр прост конструктивно, использует в качестве регулируемого привода серийное металлорежущее оборудование, а применяемые измерительные и вычислительные средства общедоступны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мини-заводы (адапт-заводы) «Даниэли» //Материалы симпозиума фирмы Даниэли в СССР. – М. : ГКНТ СССР, Danieli, 1983. Т.1.– 182 с.
2. Курандо И.Г. Технологические аспекты состыковки многоручьевых УНРС с сортовыми прокатными станами /И.Г. Курандо, С.И. Афанасьев, С.Д. Нестеров //труды Первого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 23–27 октября, 1995. – М. : Черметинформация, 1996. – С.169–171.
3. Смирнов А.Н. Metallургические мини-заводы /А.Н. Смирнов, В.М. Сифолов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун. – Донецк : Норд-пресс, 2005. – 449 с.
4. Целиков А.И. Машины и агрегаты metallургических заводов /А.И. Целиков, П.Н. Полухин, В.М. Гребенник. – М. : Metallургия, 1981. Т.3. – 576 с.
5. Королев А.А. Механическое оборудование заводов цветной metallургии /А.А. Королев, А.Г. Навроцкий, В.А. Вердеревский. В 3 ч. Ч. 3 – М. : Metallургия, 1989. – 624 с.
6. Бахтинов В.Б. Производство экономичных профилей проката /В.Б. Бахтинов, Ю.Б. Бахтинов. – М. : Metallургия, 1984. – 328 с.
7. Буркин С.П. Минимизация потребляемой мощности при производстве стального проката на литейно-деформационных модулях /С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, Е.Х. Шахпазов //Сталь. – 1996. № 6. – С. 29–33.
8. Коротков Б.А. Модули на основе совмещения МНЛЗ и прокатных средств для производства металлопродукции /Коротков Б.А. //Сталь. – 1997. № 1.– С. 22–24.
9. Burkin S.P. Projection of steel wire producing beyond the continuous-casting of ar ingot using a direct combination of casting and metal forming /S.P. Burkin, V.L. Kolmogorov, E.H. Shakhpazov, N.A. Babailov, Y.N. Loginov, V.A. Tchestnov //Journal of Materials Processing Technology. – 1999. № 86. – P.278–290.
10. Шаров А.Ф. Разработка технологии и оборудования литейно-прокатных модулей, в том числе на базе ГМНЛЗ, для получения заготовок, близких по форме к конечной продукции /А.Ф. Шаров, С.П. Буркин, Е.А. Коршунов //Материалы НТС ГКНТ СССР «Новые процессы в черной metallургии». – М. : Черметинформация, 1990. – С. 2–3.

11. Буркин С.П. Литейно-деформационные модули для металлургических и машиностроительных производств /С.П. Буркин, А.Ф. Шаров, Е.А. Коршунов, Т.Я. Менаджиев //Сталь. – 1990. № 11. – С. 50–53.
12. Буркин С.П. Перспективные установки непрерывной разливки стали. Дискуссия в НТС Минчермета СССР /С.П. Буркин, В.К. Смирнов //Сталь. – 1989. № 1.– С. 20–28.
13. Кацнельсон М.П. Машины для высоких обжатий сортовых заготовок в СССР и за рубежом. Обзор /М.П. Кацнельсон, А.А. Вайсфельд. – М. : ЦНИИТЭНтяжмаш, 1985. – 48 с.
14. Никитин Г.С. Технология производства катанки на планетарных станах. Качество продукции /Г.С. Никитин, О.В. Соколова, В.А. Вердеревский //труды Третьего конгресса прокатчиков. Липецк, 19–22 октября 1999. – М. : Черметинформация, 2000. – С. 309–312.
15. Храпченко О.К. Основные направления создания литейно-прокатных агрегатов небольшой производительности //труды Третьего конгресса сталеплавателей. Москва, 10–15 апреля 1995. – М. : Черметинформация, 1996. – С. 314–316.
16. Тетерин П.К. Прогрессивные процессы деформации с высокими обжатиями /П.К. Тетерин //труды Третьего конгресса прокатчиков. Липецк, 19–22 октября 1999. – М. : Черметинформация, 2000. – С. 313–314.
17. Храпченко О.К. Литейно-прокатный комплекс с винтовой и продольной прокаткой для производства сорта /О.К. Храпченко //труды Третьего конгресса сталеплавателей. Москва, 10–15 апреля 1995. – М. : Черметинформация, 1996. – С. 320–322.
18. Сапожников А.Я. Мини-комплекс для производства мелкого сорта на основе совмещения винтовой и продольной прокатки /А.Я. Сапожников, А.М. Кривонцов, С.П. Малютин //труды Третьего конгресса прокатчиков. Липецк, 19–22 октября 1999. – М. : Черметинформация, 2000. – С. 314–315.
19. Поварницын А.А. Непрерывное прессование алюминия способом «Conform» /А.А. Поварницын, Л.Н. Тетиор, А.И. Конухин. – Екатеринбург : Уралчерметавтоматика, 1997. – 68 с.

20. Сидельников С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов /С.Б. Сидельников, Н.И. Довженко, Н.Н. Загиров. – М. : МАКС Пресс, 2005.–344 с.
21. Буркин С.П. Горизонтальная МНЛЗ в составе литейно-деформационного комплекса /С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, Т.В. Мещанинова //Литейщик России. – 2005. № 1.– С. 24–31.
22. Волков С.М. Технология полунепрерывного прессования длинномерных полых профилей /С.М. Волков, С.П. Буркин //Цветные металлы. – 2006. № 12. – С. 88–90.
23. Буркин С.П. Непрерывное прессование заготовок через разъемный контейнер /С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов //Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. № 1.– С. 31–36.
24. Буркин С.П. Непрерывные прокатные блоки в составе литейно-деформационных комплексов /С.П. Буркин, В.К. Смирнов //труды Первого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 23–27 октября 1995. – М. : Черметинформация, 1995. – С. 171–179.
25. Пацехин П.П. Станы и рабочие клетки для прокатки мелкосортной стали и катанки / П.П. Пацехин. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – 57 с.
26. Дукмасов В.Г. Состояние и развитие технологий и оборудования в мировой черной металлургии /В.Г. Дукмасов, Л.М. Агеев. – Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2002. – 187 с.
27. Кандауров Л.Е. Бескалибровая прокатка сортовых профилей /Л.Е. Кандауров, Б.А. Никифоров, А.А. Морозов. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 1998. – 128 с.
28. Целиков Н.А. Новые работы ВНИИметмаша для трубного производства //труды Третьего конгресса прокатчиков. Липецк, 19–22 октября 1999. – М. : Черметинформация, 2000. – С. 423–428.
29. Блинов Ю.И. Проблемы развития технологий производства стальных труб на рубеже XXI века //труды Третьего конгресса прокатчиков. Липецк, 19–22 октября 1999. – М. : Черметинформация, 2000. – С. 18–20.
30. Коршунов Е.А. Технологический вариант изготовления труб из коррозионностойких сталей с переработкой металлургической окалины /Е.А. Коршу-

- нов, С.П. Буркин, Р.Ф. Исхаков, А.В. Серебряков //Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сборник статей IV Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2008. – С. 37–41.
31. Буркин С.П. Литье и деформация алюминиево-железной лигатуры.
/С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, Ю.Н. Логинов, А.Г. Титова, М.И. Волков, С.М. Волков //Литейщик России. – 2005. № 1.– С. 12–17.
32. Коршунов Е.А. Электроплавильный агрегат для реализации новых технологий на металлургических мини-заводах /Е.А. Коршунов, Д.Н. Гайнанов, В.Л. Бастриков, В.В. Фадеев, С.П. Буркин, Ф.Н. Сарапулов, В.Г. Лисиенко, В.С. Третьяков //Сталь. – 2007. № 8. С. 59–60.
33. Буркин С.П. Как изготовить полую заготовку дляковки вагонной оси
/С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, Н.А. Бабайлов, Р.Ф. Исхаков //материалы 3-й Международной конф. «Трансмет-2007». – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – С. 206–214.
34. Буркин С.П. Редукционно-растяжной стан горячей прокатки труб в линии горизонтального гидравлического пресса /С.П. Буркин, Р.Ф. Исхаков //Программа Международной научно-практической конференции «Особенности обработки и применения изделий из тяжелых цветных металлов», посвященной 65-летию ОАО «РЗ ОЦМ», г. Ревда, 6–8 декабря 2006. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. – С. 349–368.
35. Коршунов Е.А. Предпосылки к созданию мини-металлургических предприятий новой структуры /Е.А. Коршунов, В.Л. Бастриков, Д.Н. Гайнанов, С.П. Буркин, Ф.Н. Сарапулов, В.Г. Лисиенко, В.С. Третьяков //Национальная металлургия. Оборудование. – 2008. № 3.– С. 22–25.
36. Барков Л.А. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием /Барков Л.А., Выдрин В.Н., Пастухов В.В., Чернышев В.Н. – Челябинск : Металлургия, Челябинское отделение, 1988. – 304 с.
37. Софийский П.И. Современные агрегаты непрерывной разливки цветных металлов в СССР и за рубежом /П.И. Софийский, И.М. Ершов //Металлургическое машиностроение. – М. : НИИформтяжмаш, 1965. – 156 с.

38. Целиков А. И. Современное развитие прокатных станов. /А.И. Целиков, В.И.Зюзин. – М. : Металлургия, 1972. – 398 с.
39. Bungeroth R. K-Update on Kocks 3-roll rod and bar mills /R. Bungeroth //Iron and Steel Engineer. – 1972. № 10. – P. 81–89.
40. Rolling unit for a bar or the like rolling mill: pat. 4537054 USA. Cl.² B21B 13/00 /Properzi; Giulio (Milano, IT); decl. 26.05.1983; publ. 27.08.1985. – 16 p.
41. Rolling mill stand: pat. 5144827 USA. Cl.² B21B 35/00 /Iio; Itsushi (Niihama, JP), Assignee: Sumitomo Heavy Industries, Ltd (Tokyo, JP); decl. 11.07.1991; publ. 08.09.1992. – 16 p.
42. Rolling unit for a rolling mill for rolling or sizing metal pipes, bars or wires: pat. 6490901 USA. Cl.² B21B 17/00 /Potthoff; Heinrich (Hilden, DE), Assignee: Kocks Technik GmbH & Co. (Hilden, DE); decl. 28.03.2001; publ. 10.12.2002. – 22 p.
43. Rolling mill for rolling or sizing metal pipes: pat. 6945084 USA. Cl.² B21B 17/00 /Bindernagel; Ali (Wermelskirchen, DE), Bindernagel, Jr.; Ali (Solingen, DE), Moeltner; Hermann (Grevenbroich, DE), Pfeiffer; Dieter (Monheim, DE), Potthoff; Heinrich (Hilden, DE), Assignee: Kocks Technik GmbH & Co. KG (Hilden, DE); decl. 21.02.2003; publ. 20.09.2005. – 28 p.
44. Прокатная клеть с четырехвалковым калибром: а.с. 532405 СССР. МКИ B21B 17/00 /Р.Я. Яхнин, О.В. Сиверин, А.М. Шкейров [и др]. //Открытия. Изобретения. – 1976. № 39. – С. 17.
45. Прокатная клеть: а.с. 194037 СССР. МКИ B21B 17/00 /В.Н. Выдрин, В.Г. Дукмасов, О.И. Тищенко //Открытия. Изобретения. – 1967. №8. – С. 9.
46. Прокатная клеть: а.с. 288915 СССР. /В.Н. Выдрин, О.И. Тищенко, Е.Н. Березин //Открытия. Изобретения. – 1971. № 1. – С. 30.
47. Прокатная клеть: а.с. 804018 СССР. /В.Я. Выдрин, В.Г. Дукмасов, А.А. Марков //Открытия. Изобретения. – 1981. № 6. – С. 24.
48. Ковтушенко А.А., Редукторы трубопрокатного оборудования /А.А. Ковтушенко, А.Ф. Копылов, С.А. Лагутин //Вестник машиностроения. – 1985. № 10. – С. 43–47.
49. Ковтушенко А.А. Опыт оптимизации нормализованных редукторов металлургического оборудования /А.А. Ковтушенко, С.А. Лагутин //Тяжелое машиностроение. – 1990. № 5. – С. 5–7.

50. Ковтушенко А.А., Шестеренные клетки прокатных станов /А.А. Ковтушенко, С.А. Лагутин //Тяжелое машиностроение. – 1998. № 4. – С. 19–22.
51. Айрапетов Э.Л. Совершенствование зубчатых муфт и шпинделей конструкции ЭЗТМ /Э. Л. Айрапетов //Тяжелое машиностроение. – 2000. № 12. – С. 13–15.
52. Ковтушенко А.А. Совершенствование привода прокатных станов. /А.А. Ковтушенко, А.Ф. Копылов, С.А. Лагутин //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия» – 2007. № 3. – С. 52–53.
53. Гладков Г.А. Прокатка особоточных профилей /Г.А. Гладков, Ф.Е. Долженков, Л.Я. Прищенко. – М. : Металлургия, 1979. – 216 с.
54. Трехвалковый замковый калибр: а.с. 882671 СССР /Л.А. Барков, С.В. Заборских, В.В. Пастухов //Открытия. Изобретения. – 1981. № 43. – С. 42.
55. Многовалковый калибр: а.с. 959855 СССР /Л.А. Барков, В.В. Пастухов //Открытия. Изобретения. – 1982. № 35. – С. 37–38.
56. Многовалковый калибр: а.с. 725727 СССР /Л.А. Барков, В.В. Пастухов, С.А. Мымрин //Открытия. Изобретения. – 1980. № 13. – С. 41.
57. Многовалковый замковый калибр: а.с. 980878 СССР /С.В. Заборских, Л.А. Барков, В.В. Пастухов //Открытия. Изобретения. – 1982. № 46. – С. 43.
58. Многовалковый калибр: а.с. 806175 СССР /Л.А. Барков, В.В. Пастухов, С.Л. Барков //Открытия. Изобретения. – 1981. № 7. – С. 35.
59. Прокатная клеть с четырехвалковым калибром: а.с. 753503 СССР /В.Я. Выдрин, Л.А. Барков, В.В. Пастухов [и др]. //Открытия. Изобретения. – 1980. № 29. – С. 33.
60. Узел валков прокатного стана: а.с. 1202645 СССР /Ю.В. Полторапавло, В.А. Феник, В.Г. Гром /Заявит. ДонНИИЧермет. Заявл.02.07.84. Оpubл. в Б.И. 1986. № 1. – С. 12.
61. Многовалковая клеть (ее варианты): а.с. 1251987 СССР /П.М. Финагин, И.Л. Гольдштейн, Г.Б. Фокин /Заявл.15.04.85. Оpubл. в Б.И. 1986. № 31.
62. Жучков С.М. Современные проволочные станы. Тенденции развития технологии и оборудования. В 4 ч. Ч.1/С.М. Жучков, А.А. Горбанев //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». – 2006. № 6. С. 54–59.

63. Жучков С.М. Современные проволочные станы. Тенденции развития технологии и оборудования. В 4 ч. Ч.2 /С.М. Жучков, А.А. Горбанев //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». –2006. № 7. С. 30–42.
64. Жучков С.М. Современные проволочные станы. Тенденции развития технологии и оборудования. В 4 ч. Ч.3 /С.М. Жучков, А.А. Горбанев //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». – 2006. № 8. С. 40–48.
65. Жучков С.М. Современные проволочные станы. Тенденции развития технологии и оборудования. В 4. Ч./С.М.Жучков, А.А.Горбанев //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия».–2006. № 9. С. 46–54.
66. Горбасев Н.И. Достижения в области производства катанки и мелкого сорта за рубежом /Н.И.Горбасев, Е.Л.Оратовский, М.К. Сафонова //Черная металлургия. Прокатное производство.–М. : Черметинформация, 1974.–35 с.
67. Wilson N.A. High speed rod finishing mill /Wilson N.A //Kalibreur. – 1969. № 11. – P. 75–78.
68. Kobe's 4-standard rod mill //Iron and Steel Engineering. – 1974. № 7. P. 34–44.
69. Spanish rod developments //Metall Bulletin. – 1975. № 6052. – P. 42.
70. Kolbmuller W. Entwicklungen auf dem Gebiet der Herstellung von Mittelstahl, Stabstahl und Draft / Kolbmuller W., Spiecker K.H., Willman A. //Fachberichte Huttenprazis Metallweiterwerarbeitung. – 1981. № 10. – P.878–889.
71. Owen J.H. Atlantic steel Co's new roll mill /J.H. Owen, G.T Hightower //Iron and Steel Engineering. – 1970. № 8. – P. 63–69.
72. Wirion R. Le train a fill machine de Burbash /R. Wirion //Circulaire d'informations techniques. Centre documentation sidergique. – 1976. № 1. P. 43–54.
73. Кугушин А.А. Высокоскоростная прокатка катанки /А.А. Кугушин, Ю.А. Попов. – М. : Металлургия, 1982. – 144 с.
74. Иводитов А.Н. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки /А.Н. Иводитов, А.А. Горбанев. – М. : Металлургия, 1989. – 256 с.
75. Жучков С.М. Исследование энергосиловых и температурно-скоростных параметров прокатки на стане 320/150 /С.М. Жучков, В.А. Токмаков, А.Б. Сычков //Сталь. – 1999. № 6. С. 35–39.

76. Жучков С.М. Теоретические и технологические основы управления температурным режимом непрерывной сортовой прокатки /С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Л.В. Кулаков //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». – 2006. № 10. – С. 45–53.
77. Грудев А.П. Теория прокатки /А.П. Грудев: учеб. для вузов. – М. : Металлургия, 1988. – 240 с.
78. Коновалов Ю.В. Температурный режим широкополосных станов горячей прокатки /Ю.В.Коновалов, А.Л. Остапенко – М. : Металлургия, 1974. – 175 с.
79. Ноговицын А.В. Математическая модель процесса непрерывной прокатки арматурного профиля /А.В. Ноговицын, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков: Теоретические проблемы прокатного производства. Труды V Международной научно-технической конференции, 16–18 мая 2000 г. //Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. № 8. – С. 77–79.
80. Целиков А.И. Теория прокатки /А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин: справочник. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
81. Шевченко А.А. Непрерывная прокатка труб /А.А. Шевченко. – Харьков : Металлургиздат, 1954. – 268 с.
82. Потапов И.Н. Теория трубного производства /И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян. – М. : Металлургия, 1991. – 424 с.
83. Гуляев Г.И. Калибровка инструмента для производства бесшовных труб /Г.И. Гуляев. – М. : Металлургиздат, 1962. – 324 с.
84. Гуляев Г.И. Определение некоторых основных параметров редуцирования труб с натяжением /Г.И. Гуляев, В.А. Юргеленас //труды УкрНТО. – 1957. Т.ХІІІ. – С. 134–137.
85. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование стальных труб /Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М. : Металлургия, 1970. – 656 с.
86. Матвеев Б.Н. Горячая прокатка труб /Б.Н. Матвеев. – М. : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2000. – 144 с.
87. Швейкин В.В. Технология холодной прокатки и редуцирования труб /В.В. Швейкин. – Свердловск : УГТУ–УПИ, 1983. – 100 с.

88. Столетний Д.М. Пробуксовка, проволакивание и разрыв в редуционных станах /Д.М. Столетний //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». – 2005. № 9.– С. 41–44.
89. Столетний Д.М. Скоростные режимы редуционного стана /Д.М. Столетний //Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». – 2005. № 10. – С. 58–62.
90. Потапов И.Н. Технология производства труб /И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.Н. Данченко. – М. : Металлургия, 1994. – 528 с.
91. Данченко В.Н. Технология трубного производства /В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М. : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2002. – 640 с.
92. Швейкин В.В. Технологические параметры при редуцировании труб /В.В. Швейкин, П.Н. Ившин //Материалы конференции по теории и практике редуцирования труб. ЦБТИ. – Свердловск, 1965. – С. 238–241.
93. Чекмарев А.П. Калибровка редуционных и калибровочных станов /А.П. Чекмарев, Г.И. Гуляев: Прокатное и трубное производство. Приложение к журналу «Сталь». – 1958. – С. 26–31.
94. Ериклинцев В.В. Теория редуцирования труб /В.В. Ериклинцев, Ю.И. Блинов, Д.С. Фридман. – Свердловск : Средне-Уральское книжное издательство, 1970. – 232 с.
95. Звягинцев А.М. Калибровка редуционного стана без натяжения /А.М. Звягинцев //Сталь. – 1947. № 4. С. 46–49.
96. Грюнер П. Калибровка инструмента для производства бесшовных труб /П. Грюнер. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 186 с.
97. Stretch reducing mills: pat. 3952570 USA: Cl.² B21B 19/02 /Werner Demny (Dusseldorf, Germany), Hermann Moeltner (Dusseldorf, Germany), Assignee: Firma Friedrich Kocks, Dusseldorf; publ. 27.04.1976 – 5 p.
98. Гуляев Г.И. Выбор величины уширения при редуцировании труб /Г.И. Гуляев, А.И. Довгаль //Сталь. – 1965. № 6. – С. 62–64.
99. Гуляев Г.И. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб /Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин. – М. : Металлургия, 1975. – 264 с.

100. Лохмаченко А.Н. Поперечная разностенность труб при редуцировании в двух и четырехвалковых клетях /А.Н. Лохмаченко, Ю.И. Блинов, В.К. Риспель //Сталь. – 1973. № 10. – С. 927–928.
101. Stretch reducing of hollow stock: pat. 4099402 USA. Cl.² B21B 17/14 /Horst Biller (Kettwig. Fed. Rep. of Germany) Assignee: Mannesmannröhren-Werke AG, Dusseldorf, Fed. Rep. of Germany: decl. 21.06.1976; publ. 11.07.1978–6 p.
102. Миленин А.А. Математическое моделирование влияния натяжения на разностенность труб при редуцировании /А.А. Миленин, В.Н. Датченко, Н.Е. Панюшкин //Металлургическая и горнорудная промышленность. 2007. № 2. – С. 38–40.
103. Multi-stand mandrel-free stretch reducing mill: pat.6047578 USA. /Cl.² B21B 37/68 /Peter Thieven (Aachen, Germany). Assignee: Mannesmann AG, Dusseldorf, Germany /decl. 16.12.1998; publ. 11.04.2000 – 5 p.
104. Шевченко А.А. Определение утолщения стенки труб при редуцировании /А.А. Шевченко // Сталь. – 1947. № 8. – С. 236–238.
105. Гуляев Г.И. Частное изменение толщины стенки в двухвалковом овальном калибре при редуцировании и калибровании труб /Г.И. Гуляев, В.А. Юргеленас //труды УкрНИТИ. Вып. 2. – М. : Metallurgizdat, 1950. – 126 с.
106. Краев С.И. Изменение стенки трубы при редуцировании. /С.И. Краев //сб. Обработка металлов давлением, Вып. III. Metallurgizdat, 1954.
107. Глейберг А.З. Определение изменения толщины стенки труб при редуцировании /А.З. Глейберг. – М. : Metallurgizdat. ЦИИММП, – 1950. № 5.
108. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual /J.O. Hallquist. – Livermore Software Technology Corporation, 1998. – 1598 p.
109. Швейкин В.В. Об изменении толщины стенки труб при редуцировании /В.В. Швейкин, Г.Я. Гунн //Научные доклады высшей школы. – М. : Металлургия, 1958. № 4–5.
110. Колмогоров В.Л. Деформация стенки трубы при редуцировании /В.Л. Колмогоров, А.З. Глейберг: Прокатное и трубное производство. Приложение к журналу «Сталь». 1959. – С. 68–73.
111. Выдрин В.Н. Деформация полых цилиндрических тел /В.Н. Выдрин: Научные доклады высшей школы. Металлургия. – М. : Metallurgizdat. – 1959. № 1. – С.107–110.

112. Blair D. Tube reducing mills /D. Blair: Iron and Coal Trades Review, 1950. № 4270. – P.876–882.
113. Neuman T.W. Verformungstheoretische Betrachtungen zum Rohrreduzieverfahren /T.W. Neuman, D. Hancke //Stahl und Eisen. – 1955. № 22. – P.456–461.
114. Bradley N.M. Input Parameters for Metal Forming Simulation Using LSDYNA /N.M. Bradley, Z. Xinhai //6th International LS-DYNA Users Conference. 2000. – P. 1276–1282.
115. Анисифоров В.П. Определение толщины стенки и коэффициента вытяжки при редуцировании труб с натяжением /В.П. Анисифоров //труды ВНИИМЕТМАШ. ОНТИ. – 1963. № 8. – С. 486–490.
116. Bala. S. Modeling Rigid Bodies in LS-DYNA /S. Bala. – FEA Information Newsletters. – Vol.1. 2002.
117. Тарновский И.Я. Теория обработки металлов давлением /И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 432 с.
118. LS-DYNA Keyword User`s. Manual Version-Beta 971 //Livermore software. 2005. – Vol. 1. – 1964 p.
119. Гун Г.Я. Пластическое формоизменение металлов /Г.Я. Гун, П.И. Полухин, В.П. Полухин. – М. : Metallurgiya, 1958. – 346 с.
120. Bala S. Contact Modeling in LS-DYNA /S. Bala //FEA Information Newsletters. – 2001. – Vol. 8–11. – P. 541–552.
121. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб /Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М. : Metallurgiya, 1972. – 576 с.
122. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение /В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев. – М. : Metallurgiya, 1977. – 336 с.
123. Данилов Ф.А. Горячая прокатка труб /Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 502 с.
124. Гуляев Г.И. Улучшение качества труб и экономия металла при редуцировании /Г.И. Гуляев, А.Г. Ратнер, А.С. Журба. – Киев : Техника, 1989. – 144 с.
125. Редукционный стан: пат. 2215600 РФ, МКИ С2 7В21В17/14 /И.К. Тартаковский, Н.П. Рябихин, А.В. Есаков.
126. Логинов Ю.Н. Влияние натяжения на параметры прессования /Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин //Цветные металлы. – 1996. № 11. – С. 55–58.

127. Буркин С.П. Устройство натяжения профилей при прессовании /С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов, Е.А. Андрюкова //материалы Международной научно-практической конференции «Особенности обработки и применения изделий из тяжелых цветных металлов», посвященной 65-летию ОАО «РЗ ОЦМ», г. Ревда, 6–8 декабря 2006. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. – С. 256–273.
128. Устройство для создания натяжения при прессовании металлов: пат. 2278758 РФ /С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов. //МПК В21С 35/02 /Патентообладатель: УГТУ-УПИ. Оpubл. 27.06.2006. Б.И. № 18.
129. Готлиб Б.М. Основы статистической теории обработки металлов давлением /Б.М. Готлиб, И.Я. Добычин, В.М. Баранчиков. – М. : Metallurgy, 1980. – 168 с.
130. Буркин С.П. Технологические особенности применения гидропривода рабочих валков чистовых и калибровочных прокатных блоков /С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов, В.В. Шимов //труды Второго конгресса прокатчиков. – М. : Черметинформация, 1998. – С. 321–331.
131. Буркин С.П. Перспективы применения гидропривода валков непрерывных прокатных станов /С.П. Буркин, В.В. Шимов, С.М. Волков //труды Четвертого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 16–19 октября 2001. – М. : Черметинформация, 2002. – С. 288–294.
132. Сахно Ю.А. Гидравлические делители и сумматоры потоков /Ю.А. Сахно, М.Б. Траугер. – М. : Машиностроение, 1972. – 105 с.
133. Сахно Ю.А. Многоиточные гидравлические делители /Ю.А. Сахно. – М. : Машиностроение, 1988. – 160 с.
134. Праздников А.В. Гидропривод в металлургии /А.В. Праздников. – М. : Metallurgy, 1973. – 336 с.
135. Пучкин А.Е. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт гидроприводов металлургического оборудования /А.Е. Пучкин. – М. : Metallurgy, 1991. – 240 с.
136. Никитин О.Ф. Объемные гидравлические и пневматические приводы /О.Ф. Никитин, К.М. Холин. – М. : Машиностроение, 1981. – 269 с.
137. Свешников В.К. Станочные гидроприводы /В.К. Свешников. – М. : Машиностроение, 1995. – 448 с.

138. Исхаков Р.Ф. К выбору гидромотора для привода прокатной клетки /Р.Ф. Исхаков, Д.Ю. Шадрин, С.П. Буркин, Н.А. Бабайлов //Научные труды VII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2005. Ч.1. – С. 306–307.
139. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков /В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
140. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учебное пособие для вузов /А.А. Богатов. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
141. Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением /В.И. Зюзин, А.В. Третьяков. – Челябинск : Металл, 1993. – 386 с.
142. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справочник /А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : Металлургия, 1982. – 360 с.
143. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением /В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
144. Vox G.E. Some new three level designs for the study of quantitative variables /G.E. Vox, D. W. Behnken //Technometrics. – 1960. – P.455–475.
145. Спирин Н.А. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии /Н.А. Спирин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г. Денисенко. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. – 307 с.
146. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин /И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Р.М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1966. – 616 с.
147. Мочалов Н.А. Расчет на прочность деталей машин /Н.А. Мочалов, А.М. Галкин, С.Н. Мочалов. – М. : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2003. – 318 с.
148. Буркин С.П. Установка для пластометрических испытаний. /С.П. Буркин, Р.Ф. Исхаков, А.В. Разинкин, Е.А. Андрюкова //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. № 11. Т. 71. – С. 45–50.
149. Буркин С.П. Автоматизация экспериментального определения сопротивления металла горячей деформации /С.П. Буркин, Р.Ф. Исхаков, А.В. Разинкин, С.И. Паршаков //Изв. вузов. Черная металлургия. – 2006. № 1. – С. 35–39.

150. Лыков А.В. Тепло- и массообмен с окружающей газовой средой /А.В. Лыков, Т.Л. Перельман. – Минск : Наука и техника, 1965. – 238 с.
151. Brennecke N. /N. Brennecke, K. Zurdell. //Neue Hutte – 1975. № 7. – Р. 410–413.
152. Гольдштейн М.И. Специальные стали /М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер – М. : МИСИС, 1999. – 408 с.
153. Бодров Ю.В. Совершенствование прокатки труб на непрерывном и редуционном станах ТПА-80 с использованием АСУТП /Ю.В. Бодров, Д.В. Овчинников, А.Ю. Бодров, А.А. Богатов, В.В. Харитонов //Достижения в теории и практике трубного производства. Сб. науч. трудов. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. – С. 287–292.
154. Аммерлинг В.Ю. Редуцирование с натяжением и точная калибровка при производстве труб /В.Ю. Аммерлинг, Й. Сурмунд //труды Шестого конгресса прокатчиков. – Т. 2. М. : Объединение прокатчиков, 2005. – С. 239–243.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Листинги программ систем сбора, обработки и хранения опытных данных

1. Модуль P180X

```

unit P180X;
interface
type PSingle=^Single;
type PWord=^Word;
const
// return code
NoError = 0; DriverHandleError = 1; DriverCallError = 2; AdControllerError= 3;
M_FunExecError = 4; ConfigCodeError = 5; FrequencyComputeError = 6;
HighAlarm = 7; LowAlarm = 8; AdPollingTimeOut = 9; AlarmTypeError = 10;
FindBoardError = 11; AdChannelError = 12; DaChannelError = 13; InvalidateDelay
= 14; DelayTimeOut = 15; InvalidateData = 16; FifoOverflow=17;
TimeOut = 18; ExceedBoardNumber = 19; NotFoundBoard = 20; OpenError= 21;
FindTwoBoardError = 22; ThreadCreateError = 23; StopError = 24;
AllocateMemoryError = 25;
// Function of Test
function P180X_FloatSub2(fA:Single; fB:Single):Single ; stdCall;
function P180X_ShortSub2(nA:SmallInt; nB:SmallInt):SmallInt ; stdCall;
function P180X_GetDllVersion:WORD ; stdCall;
// Function of Driver
function P180X_DriverInit(Var wTotalBoards:Word):WORD ; stdCall;
procedure P180X_DriverClose; stdCall;
function P180X_GetDriverVersion(var wDriverVersion:Word):WORD ; stdCall;
function P180X_GetConfigAddressSpace(wBoardNo:Word;var wAddrTimer:Word;
var wAddrCtrl:Word; var wAddrDio:Word;
var wAddrAdda:Word):WORD ; stdCall;
function P180X_ActiveBoard(wBoardNo:Word):WORD ; stdCall;
function P180X_WhichBoardActive:WORD ; stdCall;
// Function of M_Fun series
function P180X_M_FUN_1(wDaFrequency:WORD; wDaWave:WORD; fDaAmpli-
tude:Single;
wAdClock:WORD; wAdNumber:WORD; wAdConfig:WORD;
fAdBuf:PSingle; fLowAlarm:Single;
fHighAlarm:Single):WORD ; stdCall;
function P180X_M_FUN_2(wDaNumber:WORD; wDaWave:WORD;
wDaBuf:PWord;
wAdClock:WORD; wAdNumber:WORD; wAdConfig:WORD;
wAdBuf:PWord):WORD ; stdCall;
function P180X_M_FUN_3(wDaFrequency:WORD; wDaWave:WORD;
fDaAmplitude:Single;

```

```

        wAdClock:WORD; wAdNumber:WORD; wChannelStatus:PWord;
        wAdConfig:PWord; fAdBuf:PSingle;
        fLowAlarm:Single; fHighAlarm:Single):WORD ; stdCall;
function P180X_M_FUN_4(wType:WORD; wDaFrequency:WORD; wDa-
Wave:WORD;
        fDaAmplitude:Single; wAdClock:WORD; wAdNumber:WORD;
        wChannelStatus:PWord; wAdConfig:PWord;
        fAdBuf:PSingle; fLowAlarm:Single;
        fHighAlarm:Single):WORD ; stdCall;
// Function of DI/DO
function P180X_Do(wOutData:Word):Word; stdCall;
function P180X_Di(var wDiData:Word):WORD ; stdCall;
// Function of AD/DA
function P180X_Da(wDaChannel:Word; wDaVal:Word):WORD ; stdCall;
function P180X_SetChannelConfig(wAdChannel:Word; wConfig:Word):WORD ;
stdCall;
function P180X_AdPolling(var fAdVal:Single):WORD ; stdCall;
function P180X_AdsPolling(fAdVal:PSingle; wNum:Word):WORD ; stdCall;
function P180X_AdsPacer(fAdVal:PSingle; wNum:Word;
        wSamplingDiv:Word ):WORD ; stdCall;
//*****
function P180X_ClearScan:WORD ; stdCall;
function P180X_StartScan(wSampleRateDiv:WORD; dwNum:LongInt; nPriori-
ty:SmallInt):WORD ; stdCall;
procedure P180X_ReadScanStatus(var wStatus:WORD; var dwLowAlarm:LongInt;
        var dwHighAlarm:LongInt); stdCall;
function P180X_AddToScan(wAdChannel:WORD; wConfig:WORD; wAver-
age:WORD;
        wLowAlarm:WORD; wHighAlarm:WORD;
wAlarmType:WORD):WORD ; stdCall;
function P180X_SaveScan(wAdChannel:WORD; wBuf:PWord):WORD ; stdCall;
procedure P180X_WaitMagicScanFinish(var wStatus:WORD; var dwLow-
Alarm:LongInt;
        var dwHighAlarm:LongInt); stdCall;
function P180X_StopMagicScan:WORD ; stdCall;
//*****
function P180X_DelayUs(wDelayUs:WORD):WORD ; stdCall;
//*****
wChannelStatus:PWORD;
stdCall;
function P180X_Card0_StartScan( wSampleRate:WORD; wChannel-
Status:PWORD;
        wChannelConfig:PWORD; wCount:WORD):WORD ; stdCall;
function P180X_Card0_ReadStatus(wBuf:PWORD; wBuf2:PWORD;
        var dwP1:LongInt; var dwP2:LongInt;

```



```

        var wStatus:WORD):WORD ; stdCall;
procedure P180X_Card0_Stop; stdCall;
function P180X_Card1_StartScan(wSampleRate:WORD; wChannelStatus:PWORD;
        wChannelConfig:PWORD; wCount:WORD):WORD ; stdCall;
function P180X_Card1_ReadStatus(wBuf:PWORD; wBuf2:PWORD; var
dwP1:LongInt;
        var dwP2:LongInt; var wStatus:WORD):WORD ; stdCall;
procedure P180X_Card1_Stop; stdCall;
//*****
function P180X_FunA_Start( wClock0Div:WORD; wChannel0:PWord;
        wConfig0:PWord; Buffer0:PWord; dwMaxCount0:LongInt;
        wClock1Div:WORD; wChannel1:PWord; wConfig1:PWord;
        Buffer1:PWord; dwMaxCount1:LongInt; nPriority:SmallInt):WORD ;
stdCall;
function P180X_FunA_ReadStatus:WORD ; stdCall;
function P180X_FunA_Stop:WORD ; stdCall;
function P180X_FunA_Get(var P0:LongInt; var P1:LongInt):WORD ; stdCall;
//*****
function P180X_FunB_Start( wClock0Div:WORD; wChannel0:PWord;
        wConfig0:PWord; Buffer0:PWord;
        dwMaxCount0:LongInt; nPriority:SmallInt):WORD ; stdCall;
function P180X_FunB_ReadStatus:WORD ; stdCall;
function P180X_FunB_Stop:WORD ; stdCall;
function P180X_FunB_Get(var P0:LongInt):WORD ; stdCall;
//*****
implementation
function P180X_FloatSub2; external 'P180X.DLL' name 'P180X_FloatSub2';
function P180X_ShortSub2; external 'P180X.DLL' name 'P180X_ShortSub2';
function P180X_GetDllVersion;
        external 'P180X.DLL' name 'P180X_GetDllVersion';
function P180X_GetDriverVersion;
        external 'P180X.DLL' name 'P180X_GetDriverVersion';
function P180X_DriverInit; external 'P180X.DLL' name 'P180X_DriverInit';
procedure P180X_DriverClose; external 'P180X.DLL' name 'P180X_DriverClose';
function P180X_GetConfigAddressSpace;
        external 'P180X.DLL' name 'P180X_GetConfigAddressSpace';
function P180X_ActiveBoard; external 'P180X.DLL' name 'P180X_ActiveBoard';
function P180X_WhichBoardActive;
        external 'P180X.DLL' name 'P180X_WhichBoardActive';
// Function of M_Fun series
function P180X_M_FUN_1; external 'P180X.DLL' name 'P180X_M_FUN_1';
function P180X_M_FUN_2; external 'P180X.DLL' name 'P180X_M_FUN_2';
function P180X_M_FUN_3; external 'P180X.DLL' name 'P180X_M_FUN_3';
function P180X_M_FUN_4; external 'P180X.DLL' name 'P180X_M_FUN_4';
function P180X_Do; external 'P180X.DLL' name 'P180X_Do';

```

```

function P180X_Di;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_Di';
function P180X_Da;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_Da';
function P180X_SetChannelConfig;
                        external 'P180X.DLL' name 'P180X_SetChannelConfig';
function P180X_AdPolling; external 'P180X.DLL' name 'P180X_AdPolling';
function P180X_AdsPolling; external 'P180X.DLL' name 'P180X_AdsPolling';

function P180X_AdsPacer; external 'P180X.DLL' name 'P180X_AdsPacer';
/*****
function P180X_ClearScan;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_ClearScan';
function P180X_StartScan;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_StartScan';
procedure P180X_ReadScanStatus; external 'P180X.DLL' name
'P180X_ReadScanStatus';
function P180X_AddToScan;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_AddToScan';
function P180X_SaveScan;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_SaveScan';
procedure P180X_WaitMagicScanFinish; external 'P180X.DLL' name
'P180X_WaitMagicScanFinish';
function P180X_StopMagicScan; external 'P180X.DLL' name
'P180X_StopMagicScan';
/*****
function P180X_DelayUs;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_DelayUs';
/*****
function P180X_Card0_StartScan; external 'P180X.DLL' name
'P180X_Card0_StartScan';
function P180X_Card0_ReadStatus; external 'P180X.DLL' name
'P180X_Card0_ReadStatus';
procedure P180X_Card0_Stop;      external 'P180X.DLL' name
'P180X_Card0_Stop';
function P180X_Card1_StartScan; external 'P180X.DLL' name
'P180X_Card1_StartScan';
function P180X_Card1_ReadStatus; external 'P180X.DLL' name
'P180X_Card1_ReadStatus';
procedure P180X_Card1_Stop;      external 'P180X.DLL' name
'P180X_Card1_Stop';
/*****
function P180X_FunA_Start;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_FunA_Start';
function P180X_FunA_ReadStatus; external 'P180X.DLL' name
'P180X_FunA_ReadStatus';
function P180X_FunA_Stop;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_FunA_Stop';
function P180X_FunA_Get;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_FunA_Get';
/*****
function P180X_FunB_Start;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_FunB_Start';
function P180X_FunB_ReadStatus; external 'P180X.DLL' name
'P180X_FunB_ReadStatus';
function P180X_FunB_Stop;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_FunB_Stop';

```

```
function P180X_FunB_Get;      external 'P180X.DLL' name 'P180X_FunB_Get';
end.
```

2. ОСНОВНОЙ МОДУЛЬ

```
unit main;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, Menus, ToolWin, ComCtrls, ExtCtrls, StdCtrls, Buttons, Grids,
  TeeProcs, TeEngine, Chart, Series, ImgList, jpeg;
type
//создание эканных форм
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
var
  FileDir: String; MaxPointTmp: LongInt; MaxPoint: LongInt; TotalTime:LongInt;
  TotalActivChannel: Word; Pause: Extended;
  wChannel, wConfigCode: array [0..7] of word;
  wV0, wV1, wV2, wV3, wV4, wV5, wV6, wV7: Array[0..1000000] of Single;
  SaveData: TextFile; nowtime, oldtime, SpendTime, TimeOnePoint: LongInt;
  FlagStop: byte;
implementation
uses P180X;
{$R *.dfm}
procedure TForm1.N4Click(Sender: TObject);
begin
  close;
end;
procedure TForm1.btnPassportClick(Sender: TObject);
begin
  pnlGraf.Visible:=false; pnlPassport.Visible:=true; pnlPlay.Visible:=false;
  pnlSetCard.Visible:=false; pnlSetWork.Visible:=false; pnlTable.Visible:=False;
  indPasport.Brush.Color:=cllime; indGraf.Brush.Color:=clred;
  indPlay.Brush.Color:=clred; indSetCard.Brush.Color:=clred;
  indSetWork.Brush.Color:=clred; indTable.Brush.Color:=clred;
end;
procedure TForm1.btnSetCardClick(Sender: TObject);
begin
  pnlGraf.Visible:=false; pnlPassport.Visible:=false; pnlPlay.Visible:=false;
  pnlSetCard.Visible:=true; pnlSetWork.Visible:=false; pnlTable.Visible:=False;
  indPasport.Brush.Color:=clred; indGraf.Brush.Color:=clred;
  indPlay.Brush.Color:=clred; indSetCard.Brush.Color:=cllime;
```

```

indSetWork.Brush.Color:=clred; indTable.Brush.Color:=clred;
end;
procedure TForm1.btnSetWorkClick(Sender: TObject);
begin
  pnlGraf.Visible:=false; pnlPassport.Visible:=false; pnlPlay.Visible:=false;
  pnlSetCard.Visible:=false; pnlSetWork.Visible:=true; pnlTable.Visible:=False;
  indPasport.Brush.Color:=clred; indGraf.Brush.Color:=clred;
  indPlay.Brush.Color:=clred; indSetCard.Brush.Color:=clred;
  indSetWork.Brush.Color:=clime; indTable.Brush.Color:=clred;
end;
procedure TForm1.btnPlayClick(Sender: TObject);
var
  i: Integer;
  RetValue: Word;
begin
  For i:=0 To 7 do
  begin
    wChannel[i]:=0;           //Запретить сканирование для всех каналов
    wConfigCode[i]:=$10;      //Настраиваем каналы на +/- 5V
  end;
  //////////////////////////////////Формирование массива активных каналов////////////////////////////////////
  If ChbCh0H.Checked Then wChannel[0]:=1; //Разрешаем сканирование 0-го ка-
нала
  If ChbCh1H.Checked Then wChannel[1]:=1; // ..... 1-го канала
  If ChbCh2H.Checked Then wChannel[2]:=1; //
  If ChbCh3H.Checked Then wChannel[3]:=1; //
  If ChbCh4H.Checked Then wChannel[4]:=1; //
  If ChbCh5H.Checked Then wChannel[5]:=1; //
  If ChbCh6H.Checked Then wChannel[6]:=1; //
  If ChbCh7H.Checked Then wChannel[7]:=1; //..... 7-го канала
  //////////////////////////////////Формирование массива настройки каналов////////////////////////////////////
  case CbSelRageCh0H.ItemIndex of //Устанавливаем код для 0-го канала
    0: wConfigCode[0]:=$10;      // +/- 5V
    1: wConfigCode[0]:=$11;      // +/- 0.5V
    2: wConfigCode[0]:=$12;      // +/- 0.05V
    3: wConfigCode[0]:=$13;      // +/- 0.005V
    4: wConfigCode[0]:=$14;      // +/- 10V
    5: wConfigCode[0]:=$15;      // +/- 1V
    6: wConfigCode[0]:=$16;      // +/- 0.1V
    7: wConfigCode[0]:=$17;      // +/- 0.01V
  end;
  case CbSelRageCh1H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[1]:=$10; 1: wConfigCode[1]:=$11;
    2: wConfigCode[1]:=$12; 3: wConfigCode[1]:=$13;
    4: wConfigCode[1]:=$14; 5: wConfigCode[1]:=$15;

```

```

        6: wConfigCode[1]:=$16; 7: wConfigCode[1]:=$17;
end;
case CbSelRageCh2H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[2]:=$10; 1: wConfigCode[2]:=$11;
    2: wConfigCode[2]:=$12; 3: wConfigCode[2]:=$13;
    4: wConfigCode[2]:=$14; 5: wConfigCode[2]:=$15;
    6: wConfigCode[2]:=$16; 7: wConfigCode[2]:=$17;
end;
case CbSelRageCh3H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[3]:=$10; 1: wConfigCode[3]:=$11;
    2: wConfigCode[3]:=$12; 3: wConfigCode[3]:=$13;
    4: wConfigCode[3]:=$14; 5: wConfigCode[3]:=$15;
    6: wConfigCode[3]:=$16; 7: wConfigCode[3]:=$17;
end;
case CbSelRageCh4H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[4]:=$10; 1: wConfigCode[4]:=$11;
    2: wConfigCode[4]:=$12; 3: wConfigCode[4]:=$13;
    4: wConfigCode[4]:=$14; 5: wConfigCode[4]:=$15;
    6: wConfigCode[4]:=$16; 7: wConfigCode[4]:=$17;
end;
case CbSelRageCh5H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[5]:=$10; 1: wConfigCode[5]:=$11;
    2: wConfigCode[5]:=$12; 3: wConfigCode[5]:=$13;
    4: wConfigCode[5]:=$14; 5: wConfigCode[5]:=$15;
    6: wConfigCode[5]:=$16; 7: wConfigCode[5]:=$17;
end;
case CbSelRageCh6H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[6]:=$10; 1: wConfigCode[6]:=$11;
    2: wConfigCode[6]:=$12; 3: wConfigCode[6]:=$13;
    4: wConfigCode[6]:=$14; 5: wConfigCode[6]:=$15;
    6: wConfigCode[6]:=$16; 7: wConfigCode[6]:=$17;
end;
case CbSelRageCh7H.ItemIndex of
    0: wConfigCode[7]:=$10; 1: wConfigCode[7]:=$11;
    2: wConfigCode[7]:=$12; 3: wConfigCode[7]:=$13;
    4: wConfigCode[7]:=$14; 5: wConfigCode[7]:=$15;
    6: wConfigCode[7]:=$16; 7: wConfigCode[7]:=$17;
end;
//Выводим значения максимального разброса сигнала в соответствующие поля
отчета
eMaxVoltCh0.Text:=CbSelRageCh0H.Text;
eMaxVoltCh1.Text:=CbSelRageCh1H.Text;
eMaxVoltCh2.Text:=CbSelRageCh2H.Text;
eMaxVoltCh3.Text:=CbSelRageCh3H.Text;
eMaxVoltCh4.Text:=CbSelRageCh4H.Text;

```

```

eMaxVoltCh5.Text:=CbSelRageCh5H.Text;
eMaxVoltCh6.Text:=CbSelRageCh6H.Text;
eMaxVoltCh7.Text:=CbSelRageCh7H.Text;
erNameCh0.Text:=eNameCh0.Text;
erNameCh1.Text:=eNameCh1.Text;
erNameCh2.Text:=eNameCh2.Text;
erNameCh3.Text:=eNameCh3.Text;
erNameCh4.Text:=eNameCh4.Text;
erNameCh5.Text:=eNameCh5.Text;
erNameCh6.Text:=eNameCh6.Text;
erNameCh7.Text:=eNameCh7.Text;
TotalActivChannel:=0;
//Подсчитываем число активных каналов
For i:=0 to 7 do if wChannel[i]=1 Then
    TotalActivChannel:=TotalActivChannel+1;
If TotalActivChannel=0 then
    begin
        ShowMessage('Не выбран канал(ы)');
        exit;
    end;
//режим R1
if rbR1.Checked Then
    Begin
        Pause:=StrToInt(ePause.Text);
        MaxPoint:=100000;
        TotalTime:=Round((MaxPoint-1)*Pause);
    End;
//режим R2
if rbR2.Checked Then
    Begin
        TotalTime:=StrToInt(eTotalTime.Text);
        MaxPoint:=StrToInt(eMaxPoint.Text);
        if MaxPoint=1 Then Pause:=0
        else
            Pause:=TotalTime/(MaxPoint-1);
    End;
//режим R3
if rbR3.Checked Then
    Begin
        TotalTime:=StrToInt(eTotalTime.Text);
        Pause:=StrToInt(ePause.Text);
        MaxPoint:= Round(TotalTime/Pause)+1;
    End;
//режим R4
if rbR4.Checked Then

```

```

Begin
    Pause:=StrToInt(ePause.Text);
    MaxPoint:=StrToInt(eMaxPoint.Text);
    TotalTime:=Round((MaxPoint-1)*Pause);
End;
////////////////////////proba
nowtime:=GetTickCount;
//Ch0
If wChannel[0]=1 then begin
    RetValue:= P180X_SetChannelConfig(0, wConfigCode[0]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(0) Error!!');
    P180X_DelayUs(23);
    RetValue := P180X_AdPolling(wV0[MaxPointTmp]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 0)!!');
    end;
//Ch1
If wChannel[1]=1 then begin
    RetValue := P180X_SetChannelConfig(1, wConfigCode[1]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(1) Error!!');
    P180X_DelayUs(23);
    RetValue := P180X_AdPolling(wV1[MaxPointTmp]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 1)!!');
    end;
//Ch2
If wChannel[2]=1 then begin
    RetValue := P180X_SetChannelConfig(2, wConfigCode[2]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(2) Error!!');
    P180X_DelayUs(23);
    RetValue := P180X_AdPolling(wV2[MaxPointTmp]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 2)!!');
    end;
//Ch3
If wChannel[3]=1 then begin
    RetValue := P180X_SetChannelConfig(3, wConfigCode[3]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(3) Error!!');
    P180X_DelayUs(23);
    RetValue := P180X_AdPolling(wV3[MaxPointTmp]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 3)!!');
    end;
//Ch4
If wChannel[4]=1 then begin
    RetValue := P180X_SetChannelConfig(4, wConfigCode[4]);
    If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(4) Error!!');
    P180X_DelayUs(23);
    RetValue := P180X_AdPolling(wV4[MaxPointTmp]);

```

```

        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 4)!');
        end;
//Ch5
    If wChannel[5]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(5, wConfigCode[5]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(5) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV5[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 5)!');
        end;
//Ch6
    If wChannel[6]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(6, wConfigCode[6]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(6) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV6[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 6)!');
        end;
//Ch7
    If wChannel[7]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(7, wConfigCode[7]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(7) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV7[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 7)!');
        end;
    oldtime:=GetTickCount;
    ////////////////////////////////////endproba
    TimeOnePoint:=oldtime-nowtime;
    if pause<=TimeOnePoint Then Begin
        ShowMessage('Заданная пауза меньше чем время запроса');
        exit;
        End;
        pnlGraf.Visible:=false; btnStart.Enabled:=true; pnlPassport.Visible:=false;
        pnlPlay.Visible:=true; pnlSetCard.Visible:=false;
        pnlSetWork.Visible:=false; pnlTable.Visible:=False;
        indPasport.Brush.Color:=clred; indGraf.Brush.Color:=clred;
        indPlay.Brush.Color:=cllime; indSetCard.Brush.Color:=clred;
        indSetWork.Brush.Color:=clred; indTable.Brush.Color:=clred;
    end;
    procedure TForm1.ChbCh0HClick(Sender: TObject);
    begin
    if ChbCh0H.Checked Then
        begin
            CbSelRageCh0H.Enabled:= true;

```



```

        eNameCh0.Enabled:= true;
        btnCh0.Enabled:=true;
    end else
    begin
        CbSelRageCh0H.Enabled:= false;
        eNameCh0.Enabled:= false;
        btnCh0.Enabled:=false;
    end;
end;
procedure TForm1.ChbCh1HClick(Sender: TObject);
begin
    if ChbCh1H.Checked Then
        begin
            CbSelRageCh1H.Enabled:= true;
            eNameCh1.Enabled:= true;
            btnCh1.Enabled:=true;
        end else
        begin
            CbSelRageCh1H.Enabled:= false;
            eNameCh1.Enabled:= false;
            btnCh1.Enabled:=false;
        end;
    end;
end;
procedure TForm1.ChbCh2HClick(Sender: TObject);
begin
    if ChbCh2H.Checked Then
        begin
            CbSelRageCh2H.Enabled:= true;
            eNameCh2.Enabled:= true;
            btnCh2.Enabled:=true;
        end else
        begin
            CbSelRageCh2H.Enabled:= false;
            eNameCh2.Enabled:= false;
            btnCh2.Enabled:=false;
        end;
    end;
end;
procedure TForm1.ChbCh3HClick(Sender: TObject);
begin
    if ChbCh3H.Checked Then
        begin
            CbSelRageCh3H.Enabled:= true;
            eNameCh3.Enabled:= true;
            btnCh3.Enabled:=true;
        end else

```

```

begin
    CbSelRageCh3H.Enabled:= false;
    eNameCh3.Enabled:= false;
    btnCh3.Enabled:=false;
end;
end;
procedure TForm1.ChbCh4HClick(Sender: TObject);
begin
if ChbCh4H.Checked Then
    begin
        CbSelRageCh4H.Enabled:= true;
        eNameCh4.Enabled:= true;
        btnCh4.Enabled:=true;
    end else
    begin
        CbSelRageCh4H.Enabled:= false;
        eNameCh4.Enabled:= false;
        btnCh4.Enabled:=false;
    end;
end;
end;
procedure TForm1.ChbCh5HClick(Sender: TObject);
begin
if ChbCh5H.Checked Then
    begin
        CbSelRageCh5H.Enabled:= true;
        eNameCh5.Enabled:= true;
        btnCh5.Enabled:=true;
    end else
    begin
        CbSelRageCh5H.Enabled:= false;
        eNameCh5.Enabled:= false;
        btnCh5.Enabled:=false;
    end;
end;
end;
procedure TForm1.ChbCh6HClick(Sender: TObject);
begin
if ChbCh6H.Checked Then
    begin
        CbSelRageCh6H.Enabled:= true;
        eNameCh6.Enabled:= true;
        btnCh6.Enabled:=true;
    end else
    begin
        CbSelRageCh6H.Enabled:= false;
        eNameCh6.Enabled:= false;
    end;
end;
end;

```

```

        btnCh6.Enabled:=false;
    end;
end;
procedure TForm1.ChbCh7HClick(Sender: TObject);
begin
    if ChbCh7H.Checked Then
        begin
            CbSelRageCh7H.Enabled:= true;
            eNameCh7.Enabled:= true;
            btnCh7.Enabled:=true;
        end else
        begin
            CbSelRageCh7H.Enabled:= false;
            eNameCh7.Enabled:= false;
            btnCh7.Enabled:=false;
        end;
    end;
end;
procedure TForm1.btnCh0Click(Sender: TObject);
begin
    pnlCh0.Visible:=true; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=false;
    pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=false;
    pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh1Click(Sender: TObject);
begin
    pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=true; pnlCh2.Visible:=false;
    pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=false;
    pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh2Click(Sender: TObject);
begin
    pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=true;
    pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=false;
    pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh3Click(Sender: TObject);
begin
    pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=false;
    pnlCh3.Visible:=true; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=false;
    pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh4Click(Sender: TObject);
begin
    pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=false;
    pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=true; pnlCh5.Visible:=false;

```

```

pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh5Click(Sender: TObject);
begin
pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=false;
pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=true;
pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh6Click(Sender: TObject);
begin
pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=false;
pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=false;
pnlCh6.Visible:=true; pnlCh7.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.btnCh7Click(Sender: TObject);
begin
pnlCh0.Visible:=false; pnlCh1.Visible:=false; pnlCh2.Visible:=false;
pnlCh3.Visible:=false; pnlCh4.Visible:=false; pnlCh5.Visible:=false;
pnlCh6.Visible:=false; pnlCh7.Visible:=true;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
Var
    Day,Month,Year: Word;
    tmpStr: String; RetValue: Word; TotalBoards: word;
begin
    DecodeDate(Now,Year,Month,Day); //Получаем текущее значение времени
    eDay.Text:=IntToStr(Day); //Выводим значение дня в поле
    If Month<10 Then eMonth.Text:='0'+IntToStr(Month) //Настраиваем вид
        Else eMonth.Text:=IntToStr(Month);
    tmpStr:=IntToStr(Year);
    If Length(tmpStr)>2 Then eYear.Text:=Copy(tmpStr,3,2)
        else eYear.Text:=tmpStr; //и выводим в соответствующее поле
    GetDir(0,FileDir); // в переменную FileDir значение текущего каталога
    FileDir:=FileDir+'\Files\'; Try
    CreateDir(FileDir); //создаем каталог File если он отсутствует
    Except
End;
    RetValue:=P180X_DriverInit(TotalBoards); //
    If RetValue <> 0 Then
        ShowMessage('Код ошибки: ' + IntToStr(RetValue)+#13
            + 'Ошибка подключения драйвера!!!');
    RetValue:=P180X_ActiveBoard(TotalBoards-1); //Подключение карты (акти-
    вация) под номером TotalBoards-1
    If RetValue<>0 Then
        begin

```

```

        ShowMessage('Невозможно активировать карту'+#13
                    +'Код ошибки: '+IntToStr(RetValue));
        close; //Выходим из программы при невозможности активации карты
    end else ShowMessage('Карта определена и активирована');
end;
procedure TForm1.rbR1Click(Sender: TObject);
begin
    eTotalTime.Enabled:=false; lbTotalTime.Enabled:=false;
    eMaxPoint.Enabled:=false; lbMaxPoint.Enabled:=false;
    ePause.Enabled:=true; lbPause.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.rbR2Click(Sender: TObject);
begin
    eTotalTime.Enabled:=true; lbTotalTime.Enabled:=true;
    eMaxPoint.Enabled:=true; lbMaxPoint.Enabled:=true;
    ePause.Enabled:=false; lbPause.Enabled:=false;
end;
procedure TForm1.rbR3Click(Sender: TObject);
begin
    eTotalTime.Enabled:=true; lbTotalTime.Enabled:=true;
    eMaxPoint.Enabled:=false; lbMaxPoint.Enabled:=false;
    ePause.Enabled:=true; lbPause.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.rbR4Click(Sender: TObject);
begin
    eTotalTime.Enabled:=false; lbTotalTime.Enabled:=false;
    eMaxPoint.Enabled:=true; lbMaxPoint.Enabled:=true;
    ePause.Enabled:=true; lbPause.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.btnStartClick(Sender: TObject);
Var
    RetValue: Word; i: integer; npause: Longint; xtmp, timepause: extended;
begin
    nowtime:=GetTickCount;
    for i:=1 to 1000000 do xtmp:=sin(0.5);
    oldtime:=GetTickCount;
    timepause:=(oldtime-nowtime)/1000000;           //время одного цикла
    If Pause=0 then npause:=1
        else
            npause:=Round((Pause-TimeOnePoint)/timepause); //определяем число
повторов для организации паузы между обращениями
    FlagStop:=0;
    MaxPointTmp:=0;
    ShowMessage('Начать процесс');
    Application.ProcessMessages;

```

```

    nowTime:=GetTickCount;
WHILE true DO BEGIN
    Application.ProcessMessages;
    If FlagStop=1 Then break;
//Ch0
    If wChannel[0]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(0, wConfigCode[0]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(0) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV0[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 0)!!');
        end;
//Ch1
    If wChannel[1]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(1, wConfigCode[1]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(1) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV1[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 1)!!');
        end;
//Ch2
    If wChannel[2]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(2, wConfigCode[2]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(2) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV2[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 2)!!');
        end;
//Ch3
    If wChannel[3]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(3, wConfigCode[3]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(3) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV3[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 3)!!');
        end;
//Ch4
    If wChannel[4]=1 then begin
        RetValue := P180X_SetChannelConfig(4, wConfigCode[4]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(4) Error!!');
        P180X_DelayUs(23);
        RetValue := P180X_AdPolling(wV4[MaxPointTmp]);
        If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 4)!!');
        end;
//Ch5

```

```

If wChannel[5]=1 then begin
  RetValue := P180X_SetChannelConfig(5, wConfigCode[5]);
  If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(5) Error!!');
  P180X_DelayUs(23);
  RetValue := P180X_AdPolling(wV5[MaxPointTmp]);
  If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 5)!!');
  end;
//Ch6
If wChannel[6]=1 then begin
  RetValue := P180X_SetChannelConfig(6, wConfigCode[6]);
  If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(6) Error!!');
  P180X_DelayUs(23);
  RetValue := P180X_AdPolling(wV6[MaxPointTmp]);
  If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 6)!!');
  end;
//Ch7
If wChannel[7]=1 then begin
  RetValue := P180X_SetChannelConfig(7, wConfigCode[7]);
  If RetValue <> 0 Then ShowMessage('SetChannel(7) Error!!');
  P180X_DelayUs(23);
  RetValue := P180X_AdPolling(wV7[MaxPointTmp]);
  If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Analog Input Error(Channel 7)!!');
  end;
  for i:=1 to npause do xtmp:=sin(0.5);
  MaxPointTmp:=MaxPointTmp+1;
  eMaxPointTmp.Text:=IntToStr(MaxPointTmp);
  oldtime:=GetTickCount;
  SpendTime:=OldTime-NowTime;
  eSpendTime.Text:=IntToStr(SpendTime);
  If MaxPointTmp=MaxPoint Then Break;
  END;
ShowMessage('Закончено');
end;
procedure TForm1.btnStopClick(Sender: TObject);
begin flagStop:=1; end;
procedure TForm1.btnTableClick(Sender: TObject);
var
row, col, rowtmp: Integer;
begin
  pnlGraf.Visible:=false; pnlPassport.Visible:=false;
  pnlPlay.Visible:=false; pnlSetCard.Visible:=false;
  pnlSetWork.Visible:=false; pnlTable.Visible:=true;
  indPasport.Brush.Color:=clred; indGraf.Brush.Color:=clred;
  indPlay.Brush.Color:=clred; indSetCard.Brush.Color:=clred;
  indSetWork.Brush.Color:=clred; indTable.Brush.Color:=cllime;

```

```

rowtmp:= MaxPointTmp;
if rowtmp>150 then rowtmp:=150;
Table.RowCount:=rowtmp+1;
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[0,row]:=IntToStr(row);
for col:=1 to 8 do
    Table.Cells[col,0]:=IntToStr(col)+'й по порядку';
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[1,row]:=FloatToStr(wV0[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[2,row]:=FloatToStr(wV1[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[3,row]:=FloatToStr(wV2[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[4,row]:=FloatToStr(wV3[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[5,row]:=FloatToStr(wV4[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[6,row]:=FloatToStr(wV5[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[7,row]:=FloatToStr(wV6[row-1]*1000);
for row:= 1 to rowtmp do
    Table.Cells[8,row]:=FloatToStr(wV7[row-1]*1000);
end;
procedure TForm1.btnGrafClick(Sender: TObject);
begin
    pnlGraf.Visible:=true; pnlPassport.Visible:=false; pnlPlay.Visible:=false;
    pnlSetCard.Visible:=false; pnlSetWork.Visible:=false; pnlTable.Visible:=false;
    indPasport.Brush.Color:=clred; indGraf.Brush.Color:=cllime;
    indPlay.Brush.Color:=clred; indSetCard.Brush.Color:=clred;
    indSetWork.Brush.Color:=clred; indTable.Brush.Color:=clred;
end;
procedure TForm1.ChGraf0Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf0.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series1.AddXY(i, wV0[i]*1000);
    end
    else series1.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf1Click(Sender: TObject);

```



```

var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf1.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series2.AddXY(i, wV1[i]*1000);
    end
    else series2.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf2Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf2.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series3.AddXY(i, wV2[i]*1000);
    end
    else series3.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf3Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf3.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series4.AddXY(i, wV3[i]*1000);
    end
    else series4.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf4Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf4.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series5.AddXY(i, wV4[i]*1000);
    end

```

```

    else series5.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf5Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf5.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series6.AddXY(i, wV5[i]*1000);
    end
    else series6.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf6Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf6.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series7.AddXY(i, wV6[i]*1000);
    end
    else series7.Clear;
end;
procedure TForm1.ChGraf7Click(Sender: TObject);
var
i, PointGraf: Integer;
begin
If ChGraf7.Checked Then begin
    PointGraf:=MaxPointTmp;
    If PointGraf>100 then PointGraf:=100;
    for i:=0 to PointGraf-1 do
        Series8.AddXY(i, wV7[i]*1000);
    end
    else series8.Clear;
end;
procedure TForm1.miSaveClick(Sender: TObject);
Var k: Word;
    tmpStr, FiName: String;
    i: integer;
begin
k:=1;
tmpStr:='('+FormatDateTime('ddmmmyy', Now)+')_'+IntToStr(k);

```

```

FiName:=FileDir+eName.Text+tmpStr+'.txt';
While FileExists(FiName) Do Begin
Inc(k);
tmpStr:=(''+FormatDateTime('ddmmmyy', Now)+'')_+IntToStr(k);
FiName:=FileDir+eName.Text+tmpStr+'.txt';
End;
AssignFile(SaveData,FiName);
Rewrite(SaveData);
Writeln(SaveData,'    Отчет');
Writeln(SaveData);
Writeln(SaveData,'Название испытания: '+eName.Text);
Writeln(SaveData);
Writeln(SaveData,'Дата проведения: '+FormatDateTime('ddmmmyy ', Now));
Writeln(SaveData,'Исполнитель: '+ eExec.Text);
Writeln(SaveData,'Цель проведения: '+ eAim.Text);
Writeln(SaveData);
Writeln(SaveData,'Число активных каналов: '+ IntToStr(TotalActivChannel));
Writeln(SaveData,'Время сбора данных с активных каналов (установочное): '+
IntToStr(TotalTime)+'миллисекунд');
Writeln(SaveData,'Время сбора данных с активных каналов (фактическое): '+
IntToStr(SpendTime)+'миллисекунд');
Writeln(SaveData,'Число запросов состояния входных сигналов (установочное):
'+ IntToStr(MaxPoint));
Writeln(SaveData,'Число запросов состояния входных сигналов (фактическое):
'+ IntToStr(MaxPointTmp));
Writeln(SaveData,'Пауза между запросами: '+ FloatToStr(Pause)+'миллисекунд');
Writeln(SaveData);
if ChbCh0H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 0 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh0.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh0.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV0[i]));
end;
if ChbCh1H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 1 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh1.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh1.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV1[i]));
end;

```

```

if ChbCh2H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 2 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh2.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh2.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV2[i]));
end;
if ChbCh3H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 3 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh3.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh3.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV3[i]));
end;
if ChbCh4H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 4 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh4.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh4.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV4[i]));
end;
if ChbCh5H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 5 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh5.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh5.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV5[i]));
end;
if ChbCh6H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Канал 6 ');
    Writeln(SaveData,'Источник сигнала: '+ erNameCh6.Text);
    Writeln(SaveData,'Максимальный разброс сигнала: '+ eMaxVoltCh6.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV6[i]));
end;

```

```

if ChbCh7H.Checked Then
Begin
    Writeln(SaveData); Writeln(SaveData, 'Канал 7 ');
    Writeln(SaveData, 'Источник сигнала: ' + erNameCh7.Text);
    Writeln(SaveData, 'Максимальный разброс сигнала: ' + eMaxVoltCh7.Text);
    Writeln(SaveData, 'Массив для канала, мкВ');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, Round(1000000*wV7[i]));
end;
CloseFile(SaveData); ShowMessage('Файл успешно сохранен под
именем'+#13+FiName);
end;
end.

```

Результаты вычислительного эксперимента

Таблица П2.1

Вектор столбец относительного изменения толщины стенки трубы
для матрицы планирования эксперимента

Опыт	$\frac{\Delta s}{d_{i-1}}$	Опыт	$\frac{\Delta s}{d_{i-1}}$	Опыт	$\frac{\Delta s}{d_{i-1}}$	Опыт	$\frac{\Delta s}{d_{i-1}}$
1	0,00088	21	-0,00172	41	-0,00145	61	-0,01284
2	-0,00311	22	-0,00172	42	-0,01532	62	-0,01237
3	-0,00234	23	-0,00183	43	0,00003	63	-0,00934
4	-0,00125	24	0,00012	44	-0,01212	64	-0,00321
5	-0,00127	25	-0,00027	45	-0,00912	65	-0,00423
6	-0,00023	26	0,00012	46	-0,00511	66	-0,04598
7	-0,00016	27	-0,00485	47	-0,00491	67	-0,00129
8	0,00025	28	-0,00623	48	-0,00311	68	-0,01863
9	-0,00645	29	-0,00456	49	-0,00132	69	-0,01972
10	0,00027	30	-0,00201	50	-0,00081	70	-0,01154
11	-0,00261	31	-0,00239	51	-0,01702	71	-0,01021
12	-0,00191	32	0,00002	52	0,00053	72	-0,01129
13	-0,00201	33	-0,01654	53	-0,01163	73	-0,00562
14	-0,00079	34	-0,00098	54	-0,01145	74	-0,00327
15	0,00001	35	-0,01015	55	-0,00487	75	-0,04624
16	-0,00114	36	-0,01098	56	-0,00542	76	-0,00248
17	0,00056	37	-0,00594	57	-0,04231	77	-0,01743
18	-0,00518	38	-0,00546	58	-0,00197	78	-0,01723
19	0,00072	39	-0,00125	59	-0,01991	79	-0,01564
20	-0,00349	40	-0,00182	60	-0,01543	80	-0,00974
						81	-0,00963

Таблица П2.2

Вектор столбец катающего диаметра для матрицы планирования эксперимента

Опыт	$\frac{D_k}{D}$	Опыт	$\frac{D_k}{D}$	Опыт	$\frac{D_k}{D}$	Опыт	$\frac{D_k}{D}$
1	0,99500	21	1,0128	41	1,0114	61	1,0147
2	1,0057	22	0,9963	42	1,02041	62	1,024
3	1,0135	23	1,0048	43	1,0014	63	1,028
4	0,9957	24	1,014	44	1,01241	64	1,0137
5	1,0055	25	0,9948	45	1,02043	65	1,016
6	1,013	26	1,006	46	1,00235	66	1,0325
7	0,9955	27	1,0143	47	1,01241	67	1,006
8	1,005	28	1,00258	48	1,0191	68	1,0245
9	1,0137	29	1,0125	49	1,00241	69	1,0317
10	0,993	30	1,02	50	1,0111	70	1,0145
11	1,00569	31	1,0025	51	1,02035	71	1,0237
12	1,0128	32	1,012	52	1,0011	72	1,024
13	0,99569	33	1,02058	53	1,01235	73	1,0136
14	1,0048	34	1,002	54	1,02041	74	1,0154
15	1,011	35	1,01258	55	1,014	75	1,0322
16	0,9948	36	1,0205	56	1,02	76	1,0054
17	1,003	37	1,00241	57	1,0327	77	1,0242
18	1,01369	38	1,01243	58	1,01	78	1,0316
19	0,996	39	1,0194	59	1,0247	79	1,0142
20	1,0063	40	1,00243	60	1,032	80	1,0236
						81	1,0234

Таблица П2.3

Матрица коэффициентов парной корреляции отклика (изменение толщины стенки) и факторов
(жирным выделены статистически значимые коэффициенты для уровня значимости $\alpha = 0,05$)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
		Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X1^2	X2^2	X3^2	X4^2	X5^2	X6^2	X1*X2	X1*X3	X1*X4	X1*X5	X1*X6	X2*X3	X2*X4	X2*X5	X2*X6	X3*X4	X3*X5	X3*X6	X4*X5	X4*X6	X5*X6
1	Y	1,00	-0,55	0,00	0,04	-0,39	-0,49	-0,07	-0,55	-0,01	0,04	-0,39	-0,50	-0,07	-0,42	-0,29	-0,72	-0,76	-0,52	0,03	-0,27	-0,27	-0,06	-0,14	-0,14	0,00	-0,63	-0,36	-0,40
2	X1	-0,55	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	0,66	0,76	0,87	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	X2	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,68	0,81	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	X3	0,04	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,76	0,00	0,00	0,00	0,76	0,87	0,87	0,00	0,00	0,00
5	X4	-0,39	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,68	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,81	0,81	0,00
6	X5	-0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,00	0,69
7	X6	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,69
8	X1^2	-0,55	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,65	0,75	0,85	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	X2^2	-0,01	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,67	0,80	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	X3^2	0,04	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,85	0,85	0,00	0,00	0,00
11	X4^2	-0,39	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,80	0,80	0,00
12	X5^2	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,00	0,69
13	X6^2	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,69
14	X1*X2	-0,42	0,76	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,58	0,66	0,66	0,33	0,39	0,46	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
15	X1*X3	-0,29	0,66	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,50	0,57	0,57	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	0,57	0,57	-0,02	0,00	0,00
16	X1*X4	-0,72	0,76	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,58	0,50	1,00	0,66	0,66	0,00	0,39	0,00	0,02	0,33	-0,02	0,00	0,46	0,46	0,00
17	X1*X5	-0,76	0,87	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,66	0,57	0,66	1,00	0,76	0,00	0,00	0,24	0,00	-0,02	0,19	0,00	0,24	0,00	0,30
18	X1*X6	-0,52	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,66	0,57	0,66	0,76	1,00	0,00	0,02	0,00	0,24	0,00	0,00	0,19	0,00	0,24	0,30
19	X2*X3	0,03	0,00	0,57	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,75	0,00	0,00	0,00	0,33	0,50	0,00	0,00	0,00	1,00	0,39	0,46	0,46	0,58	0,66	0,66	0,00	0,00	0,00
20	X2*X4	-0,27	0,00	0,68	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,00	0,00	0,39	0,00	0,39	0,00	0,02	0,39	1,00	0,55	0,55	0,39	0,00	0,00	0,55	0,55	0,00
21	X2*X5	-0,27	0,00	0,81	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,54	0,00	0,46	0,00	0,00	0,24	0,00	0,46	0,55	1,00	0,66	0,00	0,24	0,00	0,29	0,00	0,38
22	X2*X6	-0,06	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,54	0,46	0,00	0,02	0,00	0,24	0,46	0,55	0,66	1,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,29	0,38
23	X3*X4	-0,14	0,00	0,00	0,76	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,56	0,00	0,00	0,00	0,50	0,33	-0,02	0,00	0,58	0,39	0,00	0,00	1,00	0,66	0,66	0,46	0,46	0,00
24	X3*X5	-0,14	0,00	0,00	0,87	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,85	0,00	0,43	0,00	0,00	0,57	-0,02	0,19	0,00	0,66	0,00	0,24	0,00	0,66	1,00	0,76	0,24	0,00	0,30
25	X3*X6	0,00	0,00	0,00	0,87	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,43	0,00	0,57	0,00	0,00	0,19	0,66	0,00	0,00	0,24	0,66	0,76	1,00	0,00	0,24	0,30
26	X4*X5	-0,63	0,00	0,00	0,00	0,81	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,54	0,00	0,00	-0,02	0,46	0,24	0,00	0,00	0,55	0,29	0,00	0,46	0,24	0,00	1,00	0,66	0,38
27	X4*X6	-0,36	0,00	0,00	0,00	0,81	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,54	0,02	0,00	0,46	0,00	0,24	0,00	0,55	0,00	0,29	0,46	0,00	0,24	0,66	1,00	0,38
28	X5*X6	-0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,69	0,00	0,00	0,00	0,30	0,30	0,00	0,00	0,38	0,38	0,00	0,30	0,30	0,38	0,38	1,00

Таблица П2.4

Матрица коэффициентов парной корреляции отклика (отношение катающего диаметра к среднему диаметру валка) и факторов
(жирным выделены статистически значимые коэффициенты для уровня значимости $\alpha = 0,05$)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
		Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X1^2	X2^2	X3^2	X4^2	X5^2	X6^2	X1*X2	X1*X3	X1*X4	X1*X5	X1*X6	X2*X3	X2*X4	X2*X5	X2*X6	X3*X4	X3*X5	X3*X6	X4*X5	X4*X6	X5*X6
1	Y	1,00	0,66	-0,03	0,00	0,72	0,13	0,00	0,66	-0,02	0,00	0,70	0,12	0,00	0,48	0,44	0,91	0,65	0,57	-0,01	0,47	0,05	-0,02	0,40	0,05	0,00	0,65	0,58	0,09
2	X1	0,66	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	0,66	0,76	0,87	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	X2	-0,03	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,68	0,81	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	X3	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,76	0,00	0,00	0,00	0,76	0,87	0,87	0,00	0,00	0,00
5	X4	0,72	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,68	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,81	0,81	0,00
6	X5	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,00	0,69
7	X6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,69
8	X1^2	0,66	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,65	0,75	0,85	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	X2^2	-0,02	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,67	0,80	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	X3^2	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,85	0,85	0,00	0,00	0,00
11	X4^2	0,70	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,80	0,80	0,00
12	X5^2	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,00	0,69
13	X6^2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,43	0,00	0,54	0,69
14	X1*X2	0,48	0,76	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,58	0,66	0,66	0,33	0,39	0,46	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
15	X1*X3	0,44	0,66	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,50	0,57	0,57	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	0,57	0,57	-0,02	0,00	0,00
16	X1*X4	0,91	0,76	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,58	0,50	1,00	0,66	0,66	0,00	0,39	0,00	0,02	0,33	-0,02	0,00	0,46	0,46	0,00
17	X1*X5	0,65	0,87	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,66	0,57	0,66	1,00	0,76	0,00	0,00	0,24	0,00	-0,02	0,19	0,00	0,24	0,00	0,30
18	X1*X6	0,57	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,66	0,57	0,66	0,76	1,00	0,00	0,02	0,00	0,24	0,00	0,00	0,19	0,00	0,24	0,30
19	X2*X3	-0,01	0,00	0,57	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,75	0,00	0,00	0,00	0,33	0,50	0,00	0,00	0,00	1,00	0,39	0,46	0,46	0,58	0,66	0,66	0,00	0,00	0,00
20	X2*X4	0,47	0,00	0,68	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,67	0,00	0,00	0,39	0,00	0,39	0,00	0,02	0,39	1,00	0,55	0,55	0,39	0,00	0,00	0,55	0,55	0,00
21	X2*X5	0,05	0,00	0,81	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,54	0,00	0,46	0,00	0,00	0,24	0,00	0,46	0,55	1,00	0,66	0,00	0,24	0,00	0,29	0,00	0,38
22	X2*X6	-0,02	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,54	0,46	0,00	0,02	0,00	0,24	0,46	0,55	0,66	1,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,29	0,38
23	X3*X4	0,40	0,00	0,00	0,76	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,56	0,00	0,00	0,00	0,50	0,33	-0,02	0,00	0,58	0,39	0,00	0,00	1,00	0,66	0,66	0,46	0,46	0,00
24	X3*X5	0,05	0,00	0,00	0,87	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,85	0,00	0,43	0,00	0,00	0,57	-0,02	0,19	0,00	0,66	0,00	0,24	0,00	0,66	1,00	0,76	0,24	0,00	0,30
25	X3*X6	0,00	0,00	0,00	0,87	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,43	0,00	0,57	0,00	0,00	0,19	0,66	0,00	0,00	0,24	0,66	0,76	1,00	0,00	0,24	0,30
26	X4*X5	0,65	0,00	0,00	0,00	0,81	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,54	0,00	0,00	-0,02	0,46	0,24	0,00	0,00	0,55	0,29	0,00	0,46	0,24	0,00	1,00	0,66	0,38
27	X4*X6	0,58	0,00	0,00	0,00	0,81	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,54	0,02	0,00	0,46	0,00	0,24	0,00	0,55	0,00	0,29	0,46	0,00	0,24	0,66	1,00	0,38
28	X5*X6	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,69	0,00	0,00	0,00	0,30	0,30	0,00	0,00	0,38	0,38	0,00	0,30	0,30	0,38	1,00

Система сбора и обработки информации торсионного пластометра

Автоматизированная система сбора и первичной обработки информации ротационного пластометра состоит из датчика момента и двух датчиков замера температуры. Упрощенная функциональная схема системы измерения пластометра показана на рис. ПЗ.1.

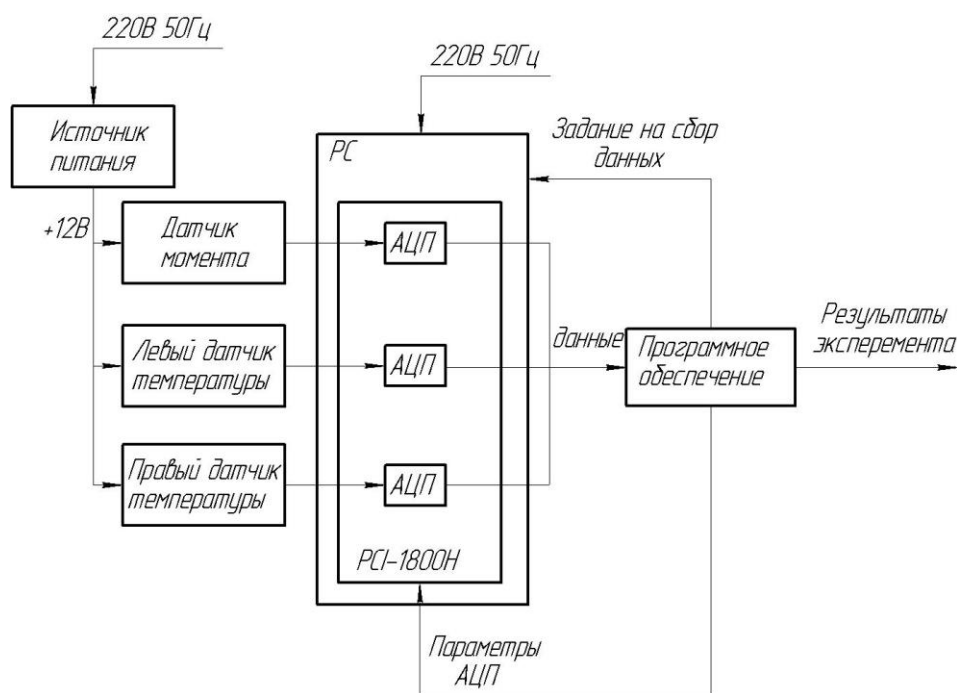


Рис. ПЗ.1. Функциональная схема системы сбора данных пластометра

Сбор данных осуществлен на базе устройства PCI-1800H, которое содержит в себе 12 однотипных каналов обработки информации с аналоговых датчиков. В системе задействовано 3 канала. Каждый из каналов содержит усилитель постоянного тока и двенадцатиразрядный аналогово-цифровой преобразователь. Для питания датчиков системы дополнительно формируется напряжение в 12В.

Физически устройство PCI-1800H с АЦП реализовано на стандартной РС плате с разъемом PCI. Питание осуществляется от встроенного источника питания РС. Для соединения с внешними аналоговыми датчиками устройство

имеет внешнюю дочернюю плату, с которой соединяется при помощи дополнительной шины.

Темп сбора информации с датчиков, параметры АЦП и начальная настройка для проведения эксперимента задается пользователем при помощи программного обеспечения (задание на сбор данных).

Считывание информации с датчиков системы происходит в двух режимах: режим нагрева и режим деформации. Момент начала режима нагрева соответствует событию включения трансформатора и соответственно момент окончания режима нагрева соответствует событию выключения трансформатора. Момент начала и конца режима нагрева соответствует событиям включения и выключения двигателя привода станка.

Для управления начальной настройкой, настройкой параметров сбора и первичной обработки данных автоматизированной системы пластометра используется программное обеспечение RotPlastControl. Программное обеспечение RotPlastControl разработано в среде Delphi3. RotPlastControl состоит из двух окон: главное окно программы (рис. ПЗ.2) и окно настройки (рис. ПЗ.3).

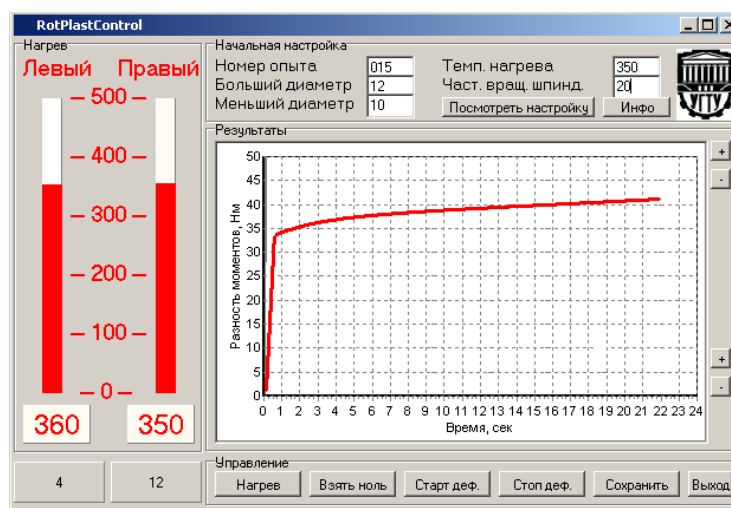


Рис. ПЗ.2. Главное окно программы сбора данных

Главное окно программы условно разбито на 4 области: область данных нагрева, область задания начальной настройки, область вывода результатов и область управления программой.

Область начальной настройки программы необходима для ввода данных идентификации эксперимента. Все параметры имеют только информационный характер и необходимы для формирования паспорта эксперимента.

Настройка

Настройка работы программы

Пауза между запросами, мс 500

Номер канала для датчика момента 4

Номер канала для левого датчика темп. 2

Номер канала для правого датчика темп. 3

Настройка параметров датчиков температуры

Коефф. темп. линейн. расширения 2,4 *10⁻⁰⁵, 1/0C

Левый Правый

a b a b

0,1584 1,5904 0,1584 1,5904

Настройка параметров датчика момента

a b

0,1474 3,9704

Сохранить Отмена

Рис. ПЗ.3. Окно «настройка»

При нажатии кнопки [Посмотреть настройку] вызывается окно настройки (см. рис. ПЗ.3). Заполнение всех полей данного окна является обязательным.

Описание параметров, входящих в данное окно:

1. Пауза между запросами, мс – этот параметр задает чистоту сбора данных с датчиков системы.
2. Номер канала для датчика момента – параметр указывает порядковый номер канала, к которому подключен датчик момента.
3. Номер канала для левого датчика температуры – параметр указывает порядковый номер канала, к которому подключен датчик температуры, установленный на левом образце.
4. Номер канала для правого датчика температуры – параметр указывает порядковый номер канала, к которому подключен датчик температуры, установленный на правом образце.
5. Область настройки датчиков температуры включает в себя коэффициент линейного температурного расширения материала образцов и коэффициенты тарировочной кривой для каждого датчика.

6. Область настройки параметров датчика момента включает в себя поля для задания коэффициентов тарировочной кривой для датчика.

Запуск режима нагрева осуществляется кнопкой [Нагрев] (см. рис. ПЗ.2), которая расположена в области [Управление] главного окна программы. При запуске режима нагрева система производит сбор данных с каналов датчиков температуры, обрабатывает их и отображает замеренную температуру образцов. Отображение температуры образцов расположено в области [Нагрев]. Параллельно цифровому отображению температуры образцов также температура отображается графически.

Для начального определения температуры образца предназначена кнопка [Взять ноль] (см. рис. ПЗ.2), которая расположена в области [Управление] главного окна программы. При нажатии этой кнопки программное обеспечение записывает текущую температуру образца, равную 20⁰С.

Запуск режима деформации осуществляется кнопкой [Нач. деф.] (см. рис. ПЗ.2), которая расположена в области [Управление] главного окна программы. При запуске режима деформации, система производит сбор данных с канала датчика момента.

При возникновении события выключения двигателя привода станка необходимо выйти из режима деформации. Выход из режима деформации осуществляется кнопкой [Стоп. Деф.] (см. рис. ПЗ.2), которая расположена в области [Управление] главного окна программы.

При выходе из режима деформации программа отображает полученные результаты в области [Результаты] в виде графика Разность моментов, Нм – Время, с.

Для формирования выходного файла отчета об опыте необходимо сохранить результаты. Сохранение текущих результатов осуществляется кнопкой [Сохранить], которая расположена в области управления главного окна программы. Имя файла результатов генерируется автоматически исходя из начальных данных настройки опыта. Путь к файлу `current_dir/results/`, где `current_dir` – папка размещения файла программы.

Листинг основного модуля main.pas

```
unit main;

interface

uses

    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, jpeg, Buttons, TeEngine, Series, TeeProcs,
    Chart;

type
// создание элементов интерфейса ПО

    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    RotPlastControl: TRotPlastControl;
    FileDir, SetDir: String;           //Для определения пути к программе
    TotalTime, MaxPointTmp: LongInt;    //Общее время сбора данных
    Pause: Integer;                    //Пауза между обращениями
    sigMoment: Array[0..10000] of single; //Массив датчика момента
    Moment: Array[0..10000] of extended;
    SaveData: TextFile;                 //Для файла данных
    nowtime, oldtime,                   //Времена
    SpendTime, TimeOnePoint: LongInt;
    FlagHeat, FlagDeform: byte; //Флаги режима работы
    canL, canR, canMoment: word;
    Alpha: Extended; La, Lb, Ra, Rb, Momenta, Momentb: extended;
    TempL, TempR: extended;

implementation

uses P180X, Sett;
```

```

{$R *.dfm}

procedure TRotPlastControl.BitBtn6Click(Sender: TObject);
begin P180X_DriverClose; close; end;

procedure TRotPlastControl.BitBtn9Click(Sender: TObject);
begin graf.LeftAxis.Maximum:=graf.LeftAxis.Maximum+10; end;

procedure TRotPlastControl.BitBtn10Click(Sender: TObject);
begin graf.LeftAxis.Maximum:=graf.LeftAxis.Maximum-10; end;

procedure TRotPlastControl.BitBtn11Click(Sender: TObject);
begin graf.LeftAxis.Minimum:=graf.LeftAxis.Minimum+10; end;

procedure TRotPlastControl.BitBtn12Click(Sender: TObject);
begin graf.LeftAxis.Minimum:=graf.LeftAxis.Minimum-10; end;

procedure TRotPlastControl.BitBtn7Click(Sender: TObject);
begin setting.ShowModal; end;

procedure TRotPlastControl.FormCreate(Sender: TObject);
var
    RetValue: Word; TotalBoards: word; setFile: TextFile;
begin
    GetDir(0,SetDir); //записываем в переменную FileDir значение текущего каталога
    FileDir:=SetDir+'\Result\';
    Try
        CreateDir(FileDir); //создаем каталог Result если он отсутствует
    Except
    End;
    RetValue:=P180X_DriverInit(TotalBoards); // Запрос о количестве карт, число
    присваивается переменной TotalBoards
    If RetValue <> 0 Then
        ShowMessage('Код ошибки: ' + IntToStr(RetValue)+#13
            + 'Ошибка подключения драйвера!!!');

```

```

    RetValue:=P180X_ActiveBoard(TotalBoards-1);      //Подключение карты
(активация) под номером TotalBoards-1
    If RetValue<>0 Then
    begin
        ShowMessage('Невозможно активировать карту'+#13
            +'Код ошибки: '+IntToStr(RetValue));
        close; //Выходим из программы при невозможности активации карты
    end else
        ShowMessage('Карта определена и активирована');
    AssignFile(setFile, SetDir+'\Setting.txt');
    Reset (setFile); readln(setFile); readln(setFile, pause); readln(setFile);
    readln(setFile, canMoment, canL, canR); readln(setFile); readln(setFile, Alpha);
    readln(setFile); readln(setFile, La, Lb, Ra, Rb, Momenta, Momentb);
end;
procedure TRotPlastControl.BitBtn1Click(Sender: TObject);
var
    i: Integer; RetValue: Word;
    sigL, sigR: extended;          //Данные л/п датчиков
    npause: Longint; xtmp, timepause: extended;
begin
    nowtime:=GetTickCount; for i:=1 to 1000000 do xtmp:=sin(0.5);
    oldtime:=GetTickCount;
    timepause:=(oldtime-nowtime)/1000000;      //время одного цикла
    If Pause=0 then npause:=1 else
        npause:=Round((Pause-TimeOnePoint)/timepause); //определяем число
повторов для организации паузы между обращениями
    flagHeat:=1; flagDeform:=0; MaxPointTmp:=0; Application.ProcessMessages;
    nowTime:=GetTickCount;
WHILE true DO
BEGIN

```

```

Application.ProcessMessages;
If (FlagHeat=0) and (flagDeform=0) Then break;
If MaxPointTmp=10000 Then break;
TempL:=0;
if flagHeat=1 Then           // Режим нагрева
Begin
eHeat.Caption:=FloatToStr(MaxPointTmp*Pause/1000);
//Читаем канал левого датчика
RetVal:=P180X_SetChannelConfig(canL, $10);
If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Ошибка канала левого датчика');
P180X_DelayUs(23);
RetVal:=P180X_AdPolling(sigL);
If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Ошибка канала левого датчика');
//Читаем канал правого датчика
RetVal:=P180X_SetChannelConfig(canR, $10);
If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Ошибка канала правого датчика');
P180X_DelayUs(23);
RetVal:=P180X_AdPolling(sigR);
If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Ошибка канала правого датчика');
SigL:=(1.85*abs(sin(MaxPointTmp/10))+10)/1000;
SigR:=(1.85*abs(cos(MaxPointTmp/10))+10)/1000;
TempL:=Round((SigL*1000*La-Lb)/(25*alpha*1e-05)+20);
TempR:=Round((SigR*1000*Ra-Rb)/(25*alpha*1e-05)+20);
eTempL.Caption:=FloatToStr(TempL);
eTempR.Caption:=FloatToStr(TempR);
End;
if flagDeform=1 Then        //Режим деформации
Begin
eDeform.Caption:=FloatToStr(MaxPointTmp*Pause/1000);
//Читаем канал датчика момента

```



```

RetVal:=P180X_SetChannelConfig(canMoment, $10);
If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Ошибка канала датчика момента');
P180X_DelayUs(23);
RetVal:=P180X_AdPolling(sigMoment[MaxPointTmp]);
If RetValue <> 0 Then ShowMessage('Ошибка канала датчика момента');
sigMoment[MaxPointTmp]:=1000000*sin(MaxPointTmp); End;
for i:=1 to npause do begin
    Application.ProcessMessages; xtmp:=sin(0.5); end;
MaxPointTmp:=MaxPointTmp+1; oldtime:=GetTickCount;
SpendTime:=OldTime-NowTime;
END;
ShowMessage('Процесс сбора данных закончен.'+#13+
    'Не забудьте сохранить результаты'); mom.Clear;
//Пересчитаем на момент
For i:=0 to MaxPointTmp-1 do Moment[i]:=(Trunc(sigMoment[i]/100)/10);
//Выводим на график
for i:=0 to MaxPointTmp-1 do mom.AddXY(i, Moment[i]); end;
procedure TRotPlastControl.BitBtn3Click(Sender: TObject);
begin flagHeat:=0; flagDeform:=1; MaxPointTmp:=0; end;
procedure TRotPlastControl.BitBtn4Click(Sender: TObject);
begin flagHeat:=0; flagDeform:=0; end;
procedure TRotPlastControl.BitBtn5Click(Sender: TObject);
Var k: Word;
    FiName: String; i: integer; SaveData: TextFile;
Begin k:=1;
FiName:=FileDir+eTestNum.Text+'_'+IntToStr(k)+'.txt';
While FileExists(FiName) Do Begin Inc(k);
FiName:=FileDir+eTestNum.Text+'_'+IntToStr(k)+'.txt'; End;
AssignFile(SaveData,FiName);
Rewrite(SaveData); Writeln(SaveData,' Отчет'); Writeln(SaveData);

```

```

Writeln(SaveData,'Номер испытания: '+ eTestNum.Text); Writeln(SaveData);
Writeln(SaveData,'Дата проведения: '+FormatDateTime('ddmmyy ', Now));
Writeln(SaveData); Writeln(SaveData,'Время сбора данных с активных каналов
(установочное): '+ IntToStr(TotalTime)+'миллисекунд');
Writeln(SaveData,'Время сбора данных с активных каналов (фактическое): '+
IntToStr(SpendTime)+'миллисекунд');
Writeln(SaveData,'Число запросов состояния входных сигналов (установочное):
'+ IntToStr(MaxPoint));
Writeln(SaveData,'Число запросов состояния входных сигналов (фактическое):
'+ IntToStr(MaxPointTmp));
Writeln(SaveData,'Пауза между запросами: '+ FloatToStr(Pause)+'миллисекунд');
Writeln(SaveData);
    Writeln(SaveData,'Замеренная разность моментов');
    For i:=0 to MaxPointTmp-1 do writeln(SaveData, FloatToStr(Moment[i]));
CloseFile(SaveData);
ShowMessage('Файл успешно сохранен под именем'+#13+FiName);
end;
end.

```

Листинг процедур обращения P180X.pas соответствует листингу процедур обращения, приведенному в приложении П1.

Пример численной реализации проектирования технологии редукионной прокатки нержавеющей труб из горячепрессованной заготовки

В соответствии с предположением о допустимой максимальной вытяжке, принятой в практике прессования коррозионно-стойких сталей и равной $\lambda_{\text{пр}}^{\text{max}} = 20$, выбраны параметры заготовки под прессования. Внешний диаметр полой заготовки под прессование $D_{\text{заг}}^{\text{вн}} = 138$ мм, диаметр отверстия заготовки под прессование $D_{\text{заг}}^{\text{от}} = 34$ мм. Отпрессованная труба имеет размеры: внешний диаметр прессованной трубы $d_0 = 45$ мм; толщина стенки прессованной трубы $s_0 = 6$ мм. С учетом размеров контейнера после распрессовки окончательная вытяжка составит $\lambda_{\text{пр}} = 19,78$. Скорость прессования $v_{\text{пр}} = 0,07$ м/с, соответственно скорость трубы на выходе из пресса составит $v_0 = 1,4$ м/с. Температура предварительного нагрева слитка под прессование $T_{\text{заг}} = 1100^\circ\text{C}$. Температура прессуемого профиля на выходе из пресса не должна превышать температуру в 1200°C , но быть достаточной для получения температуры конца прокатки, для обеспечения требуемого режима закалки. АСУ ТП управления горизонтальным гидравлическим прессом (ГГП) дискретным образом меняет скорость прессования для получения заданных температур в случае, если с этим обеспечением не справляется оборудование предварительного охлаждения и система охлаждения в линии прокатного стана.

Опорные технологические точки технологии производства труб из аустенитной нержавеющей стали для стадии прессования представлены в табл. П4.1.

Таблица П4.1

Параметры прессования

Параметр	Ед. изм.	Краткое описание	Значение
$D_{\text{заг}}^{\text{вн}}$	[мм]	Внешний диаметр заготовки под прессование	138
$D_{\text{заг}}^{\text{от}}$	[мм]	Диаметр отверстия заготовки под прессование	34
d_0	[мм]	Внешний диаметр прессованной трубы	45
s_0	[мм]	Толщина стенки прессованной трубы	6
$\lambda_{\text{пр}}$	[-]	Коэффициент вытяжки	max 20
$T_{\text{заг}}$	[°C]	Температура предварительного нагрева слитка под прессование	1100
$T_{\text{ПР}}$	[°C]	Температура металла на выходе из пресса (максимальная)	max 1200
$v_{\text{ПР}}$	[м/с]	Линейная скорость прессования (скорость пресс-штемпеля)	0,07
v_0	[м/с]	Линейная скорость трубы на выходе из пресса (скорость движения трубы на участке ГПП – РРС)	max 1,5

Система предварительного управления температурой состоит из двух секций тепловых экранов, каждая секция содержит по 7 независимо управляемых экранов. Также система содержит 2 группы охлаждающих коллекторов, каждая группа коллекторов имеет три независимых ряда форсунок для охлаждения. Перед входом в первую клетку стана установлена система воздушного отеснения воды и сбива окалины. Общая компоновка представлена на рис. 5.11 настоящей работы. После стана установлена установка регламентированного охлаждения (УРО) для закалки профиля. УРО содержит 7 независимых бочек охлаждения с регулируемым расходом охлаждающей воды.

Редукционно-растяжной стан (РРС) состоит из 20-ти клеток. В каждом межклетевом промежутке установлена система охлаждения валков и система охлаждения профиля, состоящая из трех независимых рядов форсунок (см. рис. 5.5 настоящей работы).

Опорные параметры редукционно-растяжной прокатки приведены в табл. П4.2.

Рассматривается прокатка трубы с размерами: внешний диаметр трубы на выходе из РРС $d_k = 16 \pm 0,1 \text{ мм}$; толщина стенки трубы на выходе из РРС $s_k = 1,5 \pm 0,02 \text{ мм}$ с соответствующими симметричными допусками. Допуски на размеры необходимы для сходимости математических моделей. Температура конца прокатки должна быть достаточной для осуществления закалки профиля и составлять $T_{\text{КП}} = 1150 \pm 200^\circ \text{С}$. Закалка производится в соответствии с заданным температурным профилем, регламентирующим необходимую скорость охлаждения (см. табл. П4.2).

В табл. П4.3 представлены тепловые свойства стали, принятые в расчете. Сопротивление деформации определяется методом термомеханических коэффициентов, которые приняты для стали 12Х18Н9.

Характеристики систем охлаждения представлены эквивалентными коэффициентами теплообмена. Таблица принятых коэффициентов эквивалентного теплообмена для каждой единицы оборудования системы управления температурой представлена в табл. П4.4. Параметры оборудования, координаты оборудования и дополнительные параметры, необходимые для расчета, представлены в табл. П4.5.

Таблица П4.2

Параметры редуционно-растяжной прокатки

Параметр	Ед. изм.	Краткое описание	Знач.
d_k	[мм]	Внешний диаметр трубы на выходе из РРС	16
d_k^+	[мм]	Положительный допуск на внешний диаметр трубы на выходе из РРС	0,1
d_k^-	[мм]	Отрицательный допуск на внешний диаметр трубы на выходе из РРС	0,1
s_k	[мм]	Толщина стенки трубы на выходе из РРС	1,5
s_k^+	[мм]	Положительный допуск на толщину стенки трубы на выходе из РРС	0,02
s_k^-	[мм]	Отрицательный допуск на толщину стенки трубы на выходе из РРС	0,02

Продолжение табл.П4.2

Параметр	Ед. изм.	Краткое описание	Знач.
----------	----------	------------------	-------

$T_{\text{КП}}$	[°C]	Температура конца прокатки (температура поверхности трубы на выходе из РРС)	1150
$T_{\text{КП}}^+$	[°C]	Положительный допуск на температуру конца прокатки	20
$T_{\text{КП}}^-$	[°C]	Отрицательный допуск на температуру конца прокатки	20
$T_{\text{ОХ}}$	[°C]	Температура охлаждения (температура поверхности трубы после установки охлаждения)	450
$T_{\text{ОХ}}^+$	[°C]	Положительный допуск на температуру охлаждения	15
$T_{\text{ОХ}}^-$	[°C]	Отрицательный допуск на температуру охлаждения	15
$n_{\text{кр.охл}}$	[-]	Количество точек в кривой окончательного охлаждения	2
$T - t$	[°C - с]	Опорные точки кривой охлаждения, которые задают скорость охлаждения (временная характеристика является относительным параметром)	$\begin{pmatrix} 10 & 1150 \\ 25 & 450 \end{pmatrix}$

Таблица П4.3

Тепловые свойства стали

Номер элемента	Тем-ра, °C	Плотность, кг/м ³	Уд. теплоемкость, Дж/(м с °C)]	Теплопров., Дж/(кг °C)	Коэфф. излучения
1	400	7719	615,5	41,03	0,65
2	450	7700	644,8	39,77	0,65
3	500	7681	674,1	38,52	0,65
4	550	7661	715,9	36,84	0,65
5	600	7641	766,2	36,01	0,65
6	650	7658,5	849,9	33,49	0,65
7	700	7635,5	1216,3	31,40	0,7
8	750	7626	736,9	25,75	0,7
9	800	7615	609,2	25,12	0,7
10	850	7589	605,0	24,91	0,7
11	900	7561	628,0	25,54	0,72
12	950	7534	628,0	25,96	0,75
13	1000	7508	628,0	26,80	0,78
14	1050	7481	632,2	27,21	0,8
15	1100	7455	644,8	28,05	0,82
16	1150	7429	661,5	28,89	0,85
17	1200	7403	669,9	29,73	0,85
18	1250	7377	678,3	30,56	0,85

Таблица П4.4

Коэффициенты эквивалентного теплообмена (КЭТ)

Тем-ра, °C	КЭТ, Вт/(°C·м ²)								
	КЭТ на воздухе	на установке предварительно охлаждения			в бочке установки регламентированного охлаждения (при заданном расходе воды, м ³ /ч)				
		под струей воды	под соплами воздушной очистки	под закрытыми экранами	5	10	15	20	25
300,00	32,43	2548,87	39,63	3,13	4583,87	4638,87	4740,87	4890,87	4925,87
366,70	36,43	2548,12	43,46	7,13	4583,12	4638,12	4740,12	4890,12	4925,12
433,30	41,27	2519,56	48,11	11,97	4554,56	4609,56	4711,56	4861,56	4896,56
500,00	47,00	2554,93	54,10	17,7	4589,93	4644,93	4746,93	4896,93	4931,93
566,70	53,71	2598,93	61,24	24,41	4633,93	4688,93	4790,93	4940,93	4975,93
633,30	61,13	2629,29	69,07	31,83	4664,29	4719,29	4821,29	4971,29	5006,29
700,00	73,86	2655,47	83,22	44,56	4690,47	4745,47	4847,47	4997,47	5032,47
766,70	84,27	2572,63	94,73	54,97	4607,63	4662,63	4764,63	4914,63	5949,63
833,30	95,89	2680,32	107,63	66,59	4715,32	4770,32	4872,32	5022,32	5057,32
900,00	111,00	2680,82	124,46	81,7	4715,82	4770,82	4872,82	5022,82	5057,82
966,70	121,24	2750,45	141,19	91,94	4785,45	4840,45	4942,45	5092,45	5127,45
1033,30	129,14	2755,12	149,24	99,84	4790,12	4845,12	4947,12	5097,12	5132,12
1100,00	138,40	2841,19	159,21	109,1	4876,19	4931,19	5033,19	5183,19	5218,19
1166,70	142,81	2900,47	164,17	113,51	4935,47	4990,47	5092,47	5242,47	5277,47
1233,30	142,81	2921,14	187,14	113,51	4956,14	5011,14	5113,14	5263,14	5298,14

Таблица П4.5

Параметры оборудования и входные данные для моделей АСУ ТП

Параметр	Ед.имз.	Значение
Первичные данные		
Масса заготовки под прессование	кг	
Ускорение прессования	м/с ²	0
Марка стали	-	12X18H9
Данные валков		
Количество работающих клетей		20
Идеальный диаметр валка (равный для всех клетей)	мм	350
Модуль Юнга материала вала	Н/мм ²	210000
Плотность материала рабочего вала	кг/м ³	7800
Теплопроводность материала вала	Дж/(м*с)	27,2
Удельная теплоемкость материала вала	Дж/(кг * °C)	600
Коэффициент теплового линейного расширения материала вала	1/°C	1,17E-05
Максимально допустимое усилие прокатки (для всех клетей)	кН	5000
Характеристика стана		
Расстояние между точкой очка матрицы и пирометром P0	м	0,5

Продолжение табл.П4.5

Параметр	Ед.имз.	Значение
----------	---------	----------

Длина подката первой зоны под воздушным охлаждением до первого экрана	м	0,7
Длина экрана первой группы	м	0,7
Длина экрана второй группы	м	0,7
Длина между точкой очка матрицы и первой группой сопел охлаждения	м	6,2
Длина между точкой очка матрицы и второй группой сопел охлаждения	м	11,2
Флаг действия системы очистки (0=неактивна; 1=активна)	-	1
Длина действия сопла системы очистки на поверхность профиля	м	0,3
Средняя температура воды системы очистки	°C	30
Расстояние между соплами системы очистки и осью первой клетки	м	1,6
Средняя температура окружающей среды	°C	40
Средний коэффициент излучения окружающей среды		0,78
Длина полосы, охлажденной системой охлаждения рабочих валков на входе в клетки	м	0,05
Длина полосы, охлажденной системой охлаждения рабочих валков на выходе из клетки	м	0,05
Температура воды которая используется в системе межклетевого охлаждения	°C	610
Положение меж-вых коллекторов охлаждения вдоль чистовой группы		0,18
Расстояние между осью последней клетки и пирометром на выходе P2	м	0,8
Средняя температура воды на охлаждение валков	°C	30
Средняя температура рабочих валков	°C	25
Идеальный диаметр валка	м	0,4
Межклетевое расстояние, по осям клеток	м	0,5
Расстояние между последней катающей клетью до первой бочки охлаждения	м	1,5
Длина рабочей области бочки охлаждения	м	1,2
Расстояние между начальными точками рабочих областей бочек охлаждения	м	1,8
Расстояние между последней бочкой охлаждения до пирометра P3	м	0,5

Для примера численной реализации проектирования технологии редуционной прокатки труб из коррозионно-стойкой стали из горячепрессованной заготовки были рассчитаны следующие параметры, необходимые для управления процессом прессования–прокатки:

– d_i – диаметр трубы (целевой параметр);

- $\varepsilon_{\varnothing}$ – обжатие трубы по диаметру (информационный параметр);
- s_i – толщина стенки трубы (целевой параметр);
- v_i – линейная скорость трубы в промежутке (информационный параметр);
- z_i – коэффициент пластического натяжения (параметр управления);
- n_i – число оборотов валков по линии прокатного стана (параметр управления);
- μ_i – суммарная вытяжка за процесс прокатки (информационный параметр);
- τ – время прохождения точки полосы межклетевого промежутка (по осям клеток);
- $M_{\text{пр}}$ – полный момент прокатки;
- вышеперечисленные параметры приведены в табл. П4.6;
- T_i – температура металла за весь процесс прессования–прокатки–регламентированного охлаждения (целевой параметр);
- k_1 – десятичное представление битовой маски тепловых панелей (параметр управления);
- k_2 – десятичное представление битовой маски сопел системы предварительного охлаждения (параметр управления);
- k_3 – десятичное представление битовой маски сопел системы межклетевого охлаждения (параметр управления);
- k_4 – десятичное представление битовой маски бочек системы регламентированного охлаждения (параметр управления);
- Q – расход воды в бочках системы регламентированного охлаждения (параметр управления);

График изменения температуры показан на рис. П4.1. и шаблоны оборудования приведены в табл. П4.7.

Расчет производился из предположения о постоянстве температуры прессования $T_{\text{пр}} = 1150^{\circ}\text{C}$ и постоянной скорости прессования $v_0 = 1,4 \text{ м/с}$.

Численная реализация проектирования технологии
редукционной прокатки труб

Номер клетки	d_i , мм	ε_{\emptyset}	s_i , мм	v_i , м/с	z_i	n_i	μ_i	τ , с	$M_{пр}$, Н·м
-	45.00	-	6.00	1.40	0.30	-	-	0.357143	
1	43.74	2.80	5.99	1.45	0.50	139.36	1.03	0.34512	444.21
2	41.29	5.60	5.53	1.66	0.60	143.78	1.18	0.301825	430.14
3	38.98	5.60	5.10	1.90	0.67	163.94	1.35	0.263705	426.24
4	36.80	5.60	4.71	2.17	0.67	187.13	1.55	0.230651	418.41
5	34.73	5.60	4.35	2.48	0.67	213.40	1.77	0.201732	402.89
6	32.79	5.60	4.01	2.84	0.67	243.41	2.03	0.17614	363.51
7	30.95	5.60	3.70	3.25	0.67	278.15	2.32	0.153904	329.14
8	29.22	5.60	3.41	3.72	0.74	317.66	2.66	0.134329	305.74
9	27.58	5.60	3.15	4.26	0.74	363.23	3.04	0.11747	268.75
10	26.04	5.60	2.90	4.88	0.74	414.58	3.49	0.102417	240.27
11	24.58	5.60	2.67	5.60	0.74	474.67	4.00	0.089289	234.37
12	23.20	5.60	2.46	6.42	0.74	543.55	4.59	0.077887	220.24
13	21.90	5.60	2.27	7.35	0.74	622.15	5.25	0.068027	217.29
14	20.68	5.60	2.09	8.43	0.74	711.26	6.02	0.059294	215.47
15	19.52	5.60	1.93	9.65	0.74	813.88	6.89	0.051815	212.45
16	18.25	6.51	1.78	11.17	0.67	929.97	7.98	0.044745	210.95
17	17.08	6.41	1.64	12.94	0.67	1074.93	9.24	0.038647	198.08
18	16.40	3.98	1.55	14.23	0.50	1255.34	10.17	0.03513	150.61
19	16.20	1.22	1.51	14.77	0.40	1379.28	10.55	0.033855	120.96
20	16.00	1.23	1.50	15.06	0.00	1405.41	10.76	0.033196	99.79

На рис. П4.1 показано изменение средней температуры (скользящее среднее) для промежутка $[x_0; x_{180}]$; температура поверхности (нижняя линия) и температура на внутренней стенке трубы (верхняя линия) для промежутка $[x_{180}; x_{195}]$. Для стационарного процесса (при температуре прессования $T_{пр} = 1150^\circ\text{C}$ и постоянной скорости прессования $v_0 = 1,4\text{ м/с}$) изменение температуры показано линией 1. Так как прокатка при такой скорости происходит с разогревом, то система предварительного управления температурой не была задействована: для этого случая $k_1 = 0$ (все тепловые экраны находятся в состоянии «открыто») и $k_2 = 0$ (сопла системы предварительного охлаждения не ак-

тивны), соответственно происходит охлаждение профиля на воздухе. В результате при прохождении прессуемого профиля на воздухе от ГПП до РРС происходит падение температуры на 45°C . Десятичное представление битовой маски сопел системы межклетевого охлаждения $k_3 = 40367785246665$ и соответствующий ему шаблон показан в табл. П4.7 (случай №1). При таком шаблоне достигается температура конца прокатки $T_{\text{КП}} = 1150^{\circ}\text{C}$. В соответствии с заданным профилем охлаждения (см. табл. П7.2) рассчитывается истинный профиль охлаждения (показан пунктирной линией на рис. П4.1) и подбирается соответствующий расход и состояние бочек охлаждения. Для случая 1 десятичное представление битовой маски бочек системы регламентированного охлаждения $k_4 = 127$, что соответствует всем включенным бочкам охлаждения. В этом случае расход, который система выбрала для заданного охлаждения, $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (равный для всех бочек при давлении воды 1,2 МПа).

Таблица П4.7

Шаблоны включения сопел системы межклетевого охлаждения

	Номер межклетевого промежутка																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Случай 1	000	000	000	001	001	001	011	011	011	011	011	011	111	101	111	111	001	001	001
Случай 2	011	000	000	001	001	001	011	011	011	011	011	011	111	101	111	111	001	001	001
Случай 3	000	000	000	001	000	000	001	001	001	001	001	001	011	001	011	011	001	001	001

Для демонстрации работы моделей предположим, что в некоторый момент времени температура прессования поднимется до значения 1200°C (случай 2) или опустится до значения 1050°C (случай 3). Для случая 2 происходит перераспределение шаблонов оборудования системы предварительного охлаждения: $k_1 = 0$ (все тепловые экраны находятся в состоянии «открыто») и $k_2 = 63$ (все сопла системы предварительного охлаждения активны), соответственно происходит охлаждение профиля на воздухе и под струями воды. В результате при прохождении прессуемого профиля от ГПП до РРС происходит падение

температуры на 90°C , также изменится шаблон системы межклетевого охлаждения (см. табл. П4.7, случай 2).

Для случая 3 также происходит перераспределение шаблонов: $k_1 = 16383$ (все тепловые экраны находятся в состоянии «закрыто») и $k_2 = 0$ (сопла системы предварительного охлаждения не активны), соответственно происходит охлаждение профиля на воздухе. В результате при прохождении прессуемого профиля на воздухе от ГТП до РРС происходит падение температуры на 30°C , также изменится шаблон системы межклетевого охлаждения (см. табл. П4.7, случай 3).

Во всех трех случаях температура конца прокатки остается постоянно, при этом достигается постоянство условий для закалки профиля с заданной скоростью охлаждения. При этом скорость прессования остается неизменной, что говорит о широкой степени свободы для систем охлаждения в линии стана и систем установки контролируемого охлаждения. Таким образом, в приведенных примерах настройки оборудования использован только первый контур управления температурой (управления оборудованием охлаждения).

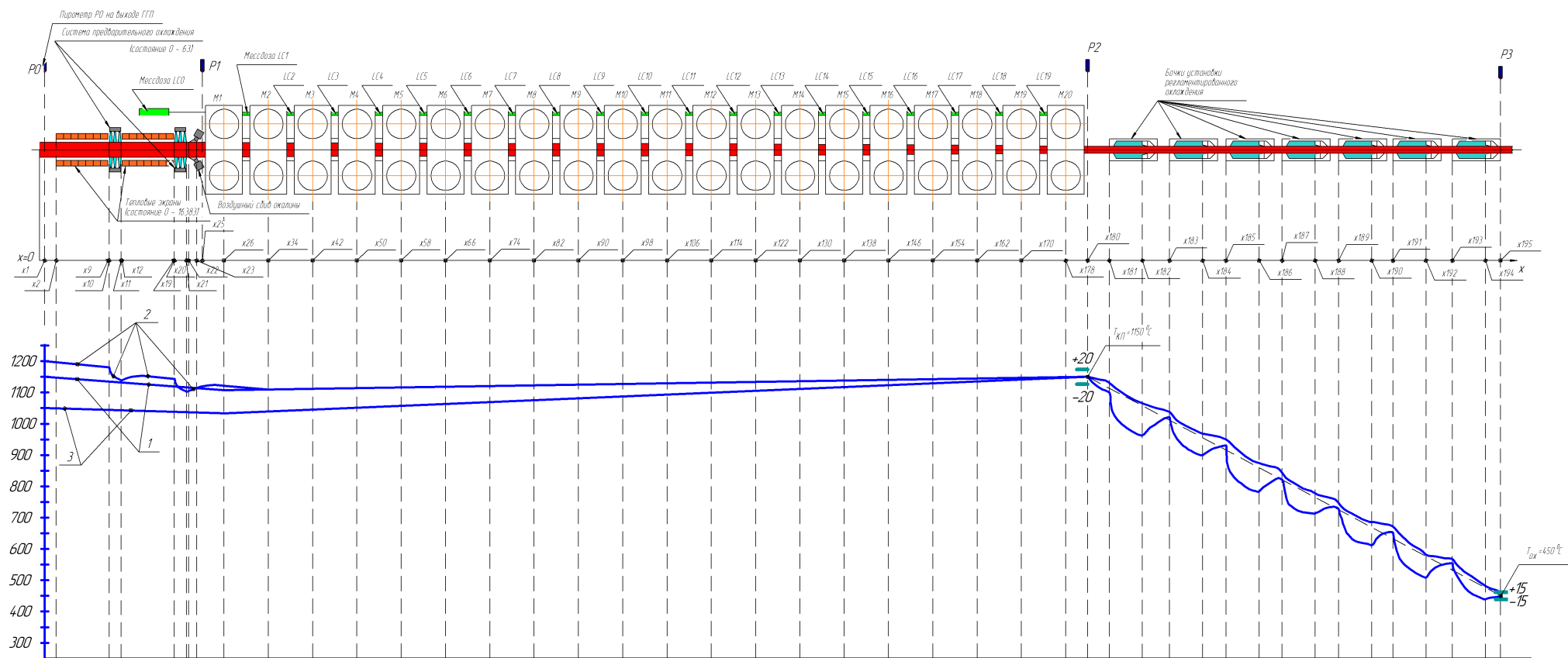


Рис. П4.1. Численная реализация проектирования технологии
редукционной прокатки труб: график изменения температуры по линии стана

Учебное издание

Буркин Сергей Павлович
Шимов Виктор Васильевич
Исхаков Руслан Фанисович
Андрюкова Елена Анатольевна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ
С МНОГОВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Редакторы *Н.В. Рощина, О.В. Протасова*

Компьютерный набор *авторский*

Пописано в печать 02.11.2009 г. Формат 60х84 1/16
Бумага писчая. Плоская печать. Усл.печ.л. 22,0
Уч.-изд.л. 21,6. Тираж 300 экз. Заказ 537

Редакционно-издательский отдел УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, Мира,19
rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, Мира,19